



TITLE:

大学連合とフランス原子力庁による次世代型軽水炉の物理に関する共同研究

AUTHOR(S):

代谷, 誠治

CITATION:

代谷, 誠治. 大学連合とフランス原子力庁による次世代型軽水炉の物理に関する共同研究. 2006

ISSUE DATE:

2006-06

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/80165>

RIGHT:

学術雑誌掲載論文の抜き刷り、出版社に著作権許諾が得られていないため未掲載。

大学連合とフランス原子力庁による
次世代型軽水炉の物理に関する共同研究

15206113

平成 15 年度～平成 17 年度科学研究費補助金
(基盤研究 (A)) 研究成果報告書

平成 18 年 6 月

研究代表者 代 谷 誠 治

京都大学原子炉実験所 教授

大学連合とフランス原子力庁による 次世代型軽水炉の物理に関する共同研究

(課題番号：15206113)

研究組織

研究代表者	:	代 谷 誠 治	(京都大学原子炉実験所教授)
研究分担者	:	三 澤 毅	(京都大学原子炉実験所助教授)
研究分担者	:	宇根崎 博 信	(京都大学原子炉実験所助教授)
研究分担者	:	中島 健	(京都大学原子炉実験所助教授)
研究分担者	:	卞 哲浩	(京都大学原子炉実験所助手)
研究分担者	:	竹 田 敏 一	(大阪大学大学院工学研究科教授)
研究分担者	:	山 本 敏 久	(大阪大学大学院工学研究科助教授)
研究分担者	:	北 田 孝 典	(大阪大学大学院工学研究科助手)
研究分担者	:	山 根 義 宏	(名古屋大学大学院工学研究科教授)
研究分担者	:	北 村 康 則	(名古屋大学大学院工学研究科教授)
研究分担者	:	橋 本 憲 吾	(近畿大学原子力研究所教授)
研究分担者	:	岩 崎 智 彦	(東北大学大学院工学研究科教授)
研究分担者	:	相 沢 乙 彦	(武蔵工業大学工学部教授)

海外共同研究者

研究分担者	:	Alain Zaetta	(フランス原子力庁原子炉サイクル物理研究部部長)
研究分担者	:	Alain Santamarina	(フランス原子力庁原子炉サイクル物理研究部室長)
研究分担者	:	Stéphane Cathalau	(フランス原子力庁原子炉サイクル物理研究部室長)

交付決定額（配分額）

(金額単位：千円)

	直接経費	間接経費	合 計
平成 15 年度	12,400	3,720	16,120
平成 16 年度	9,900	2,970	12,870
平成 17 年度	8,100	2,430	10,530
総 計	30,400	9,120	39,520

研究発表

学会誌等：

- 1) C. H. Pyeon, T. Misawa, H. Unesaki and S. Shiroya, “Experiments and Analyses for Relationship between Flux Tilt in Two-Energy-Group Model and First-Mode Eigenvalue Separation”, J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 40[2], pp. 171-176, 2004.

口頭発表：

- 1) C. H. Pyeon, Y. Hirano, T. Misawa, H. Unesaki and S. Shiroya, “Preliminary Study on ADSR by Using FFAG Accelerator in KUCA”, Proc. GLOBAL 2003, Atoms for Prosperity: Updating Eisenhower’s Global Vision for Nuclear Energy, pp.2193-2200, New Orleans, Louisiana, U.S.A., Nov. 18, 2003.
- 2) Tsuyoshi Misawa, Hironobu Unesaki, Cheol Ho Pyeon, Chihiro Ichihara, Yasunori Kitamura and Seiji Shiroya, “Research on Accelerator Driven Subcritical Reactor at Kyoto University Critical Assembly (KUCA) with the FFAG Proton Accelerator”, Proc. PHYSOR-2004, The Physics of Fuel Cycles and Advanced Nuclear Systems: Global Developments, Session 2B, Chicago, Illinois, U.S.A., April 27, 2004.
- 3) Hironobu Unesaki, Tsuyoshi Misawa, Chihiro Ichihara, Keiji Kobayashi, Hiroshi Nakamura, Seiji Shiroya, and Kazuhiko Kudo, “Criticality Analysis of Highly Enriched Uranium / Thorium Fueled Thermal Spectrum Cores of Kyoto University Critical Assembly”, Proc. PHYSOR-2004, The Physics of Fuel Cycles and Advanced Nuclear Systems: Global Developments, Session 5C, Chicago, Illinois, U.S.A., April 28, 2004.
- 4) Tsuyoshi Misawa, Hironobu Unesaki, Cheol Ho Pyeon, Chihiro Ichihara, and Seiji Shiroya, “Research on Accelerator Driven Subcritical System at Kyoto University Critical Assembly (KUCA) with the FFAG Proton Accelerator”, Fourth International Workshop on Utilisation and Reliability of High Power Proton Accelerators, Technical Session III, KAERI, Daejeon, Republic of Korea, May 18, 2004.
- 5) 三澤 毅, “京都大学原子炉実験所における FFAG 陽子加速器を用いた加速器駆動未臨界炉の基礎実験”, 日本原子力学会中部支部第 36 回研究発表会, L2, 名古屋大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリ, 2004 年 12 月 7 日.
- 6) 三澤 毅、宇根崎博信、代谷誠治、岡嶋成晃、安藤真樹、福島昌宏, “光ファイバー検出器を用いた高速炉体系の中性子束分布の精密測定”, 東京大学大学院工学系研究科 原子力専攻設立記念シンポジウムプログラム 「原子力分野の人材育成と産官学連携の在り方」, 全国共同研究部門, 東京大学, 2005 年 3 月 8 日・9 日.

出版物：

なし

平成15年度～平成17年度科学研究費補助金研究成果報告書概要

1. 機 関 番 号

14301

2. 研究機関名 京都大学

3. 研究種目名 基盤研究（A）

4. 研究期間 平成 15年度 ～ 平成 17年度

5. 課 題 番 号

15206113

6. 研究課題名 大学連合とフランス原子力庁による次世代型軽水炉の物理に関する共同研究

7. 研究代表者

研究者番号	研究代表者名	所属部局名	職 名
80027474	フリガナ シロヤ セイジ 代谷 誠治	原子炉実験所	教授

8. 研究分担者(所属研究機関名は、研究代表者の所属研究機関と異なる場合に記入すること)

研究者番号	研究分担者名	所属研究機関名・部局名	職 名
70219616	フリガナ ミサワ ツヨシ 三澤 毅	原子炉実験所	助教授
40213467	フリガナ ウネサキ ヒロノブ 宇根崎 博信	原子炉実験所	助教授
30116058	フリガナ タケダ トシカズ 竹田 敏一	大阪大学・大学院工学研究科	教授
60115649	フリガナ ヤマネ ヨシヒロ 山根 義宏	名古屋大学・大学院工学研究科	教授
70184869	フリガナ イワサキ トモヒコ 岩崎 智彦	東北大学・大学院工学研究科	助教授

9. 研究成果の概要(当該研究期間のまとめ、600字～800字、図、グラフ等は記載しないこと)

本研究では、次世代型軽水炉において、①プルトニウム(Pu)燃料の利用に伴って重要性が増す共鳴吸収効果の計算法、②Pu 燃料の燃焼に伴うマイナーアクチニド(MA)蓄積量の評価法、③実験による核データ、核計算評価法等の飛躍的な精度向上に向けた取り組みを行いつつ、④これらの要請に見合った炉物理実験手法の開発と高度化を目標として国際共同研究を行い、炉物理設計・解析手法の高度化をフランス原子力庁(CEA)の実験施設及び京都大学臨界集合体実験装置(KUCA)を用いた実験により検証しながら達成して、次世代型軽水炉設計の高度化に資する基盤の構築を目指すこととした。日本側としては、①については大阪大学のグループ、②については東北大学のグループ、③、④については京都大学及び名古屋大学のグループが中心となり、適宜、フランス側と電子メールなどで連絡を取り合いながら研究を進めた。なお、平成 14 年度から文部科学省における革新的原子力システム技術開発公募事業の枠組みの下、京都大学で5ヶ年計画の加速器駆動未臨界炉の技術開発に関するプロジェクトが開始されたことから、これに関連する実験研究の比重が高まることになった。また、KUCA において蓄積された炉物理実験データの解析・評価を進め、次世代型軽水炉開発のベースとなる核データ及び核計算コードの評価に役立てるため、ベンチマークデータとして活用することを目指して研究を進めた。ちなみに、本共同研究の遂行に際しては、双方の研究成果を持ち寄って発表・討論を行う日仏セミナーを、毎年、交互に双方で開催することを基本とした。また、本研究については、平成 18 年度から基盤研究(A)(1)「大学連合とフランス原子力庁による次世代型軽水炉の研究開発に関する炉物理の共同研究」に引き継がれることとなった。

10. キーワード

(1) 次世代型軽水炉

(2) 原子炉物理

(3) 共鳴自己遮蔽

(4) マイナーアクチニド

(5) 核データ

(6) 核計算

(7) 加速器駆動未臨界炉

(8) 実験手法

(裏面に続く)

11. 研究発表（印刷中も含む。）

【雑誌論文】 計（ 7 ） 件

著 者 名	論 文 標 題	雑 誌 名	巻・号	発 行 年	ペー ジ
C. H. Pyeon	Preliminary Study on ADSR by Using FFAG Accelerator in KUCA				
		Proc. GLOBAL 2003, Atoms for Prosperity: Updating Eisenhower's Global Vision for Nuclear Energy, New Orleans, Louisiana, U.S.A.		2 0 0 3	2193-2200

著 者 名	論 文 標 題	雑 誌 名	巻・号	発 行 年	ペー ジ
C. H. Pyeon	Experiments and Analyses for Relationship between Flux Tilt in Two-Energy-Group Model and First-Mode Eigenvalue Separation				
		J. Nucl. Sci. Technol.	41・2	2 0 0 4	171-176

著 者 名	論 文 標 題	雑 誌 名	巻・号	発 行 年	ペー ジ
Tsuyoshi Misawa	Research on Accelerator Driven Subcritical Reactor at Kyoto University Critical Assembly (KUCA) with the FFAG Proton Accelerator				
		Proc. PHYSOR-2004, The Physics of Fuel Cycles and Advanced Nuclear Systems: Global Developments, Session 2B, April 27, 2004, Chicago, Illinois, U.S.A.		2 0 0 4	

著 者 名	論 文 標 題	雑 誌 名	巻・号	発 行 年	ペー ジ
Hironobu Unesaki	Criticality Analysis of Highly Enriched Uranium / Thorium Fueled Thermal Spectrum Cores of Kyoto University Critical Assembly				
		Proc. PHYSOR-2004, The Physics of Fuel Cycles and Advanced Nuclear Systems: Global Developments, Session 5C, April 28, 2004, Chicago, Illinois, U.S.A.		2 0 0 4	

著 者 名	論 文 標 題	雑 誌 名	巻・号	発 行 年	ペー ジ
Tsuyoshi Misawa	Research on Accelerator Driven Subcritical System at Kyoto University Critical Assembly (KUCA) with the FFAG Proton Accelerator				
		Fourth International Workshop on Utilisation and Reliability of High Power Proton Accelerators, Technical Session III, 18 May 2004, KAERI, Daejeon, Repu, April 28, 2004blic of Korea		2 0 0 4	

著 者 名	論 文 標 題	雑 誌 名	巻・号	発 行 年	ペー ジ
三澤 毅	京都大学原子炉実験所における FFAG 陽子加速器を用いた加速器駆動未臨界炉の基礎実験				
		日本原子力学会中部支部 第 36 回研究発表会, L2, 2004 年 12 月 7 日, 名古屋大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリ		2 0 0 4	

著 者 名	論 文 標 題	雑 誌 名	巻・号	発 行 年	ペー ジ
三澤 毅	光ファイバー検出器を用いた高速炉体系の中性子束分布の精密測定				
		東京大学大学院工学系研究科 原子力専攻設立記念シンポジウムプログラム「原子力分野の人材育成と産官学連携の在り方」, 全国共同研究部門, 東京大学.		2 0 0 5	

【図 書】 計（ 0 ）件

著 者 名	出 版 社				
書 名				発 行 年	総ページ数

12. 研究成果による工業所有権の出願・取得状況

計（ 0 ）件

工業所有権の名称	発明者	権利者	工業所有権の種類、番号	出願年月日	取得年月日

ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECT, GRANT- IN-AID FOR SCIENTIFIC RESEARCH (A)

1. RESEARCH INSTITUTION NUMBER : 14301

2. RESEARCH INSTITUTION : KYOTO UNIVERSITY

3. CATEGORY : Grant-in-Aid for Scientific Research (A)

4. TERM OF PROJECT (2003 ~ 2005)

5. PROJECT NUMBER : 15206113

6. TITLE OF PROJECT :

Joint Study on Reactor Physics for Light Water Reactors of Next Generation between Japanese University Association and Commissariat à l'Energie Atomique of France -

7. HEAD INVESTIGATOR

REGISTERED NUMBER	NAME	INSTITUTION, DEPARTMENT, TITLE OF POSITION
80027474	SHIROYA, Seiji	Kyoto University, Research Reactor Institute, Professor

8. INVESTIGATORS

(1) 70219616	MISAWA, Tuyoshi	Kyoto University, Research Reactor Institute, Associate Professor
(2) 40213467	UNESAKI, Hironobu	Kyoto University, Research Reactor Institute, Associate Professor
(3) 30116058	TAKEDA, Toshikazu	Osaka University, Graduate School of Engineering, Professor
(4) 60115649	YAMANE, Yoshihiro	Nagoya University, Graduate School of Engineering, Professor
(5) 70184869	IWASAKI, Tomohiko	Tohoku University, Graduate School of Engineering, Associate Professor

9. SUMMARY OF RESEARCH RESULTS

A cooperative research between Japan and France was initiated to promote the study on the reactor physics of next generation in April 1993. The cooperation agreement was concluded between the Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) and the Japanese University Association (JUA) involved in the joint use program of the Kyoto University Critical Assembly (KUCA). In the present study, the research and development on ① the computational method of resonance self-shielding including Doppler effects, ② the evaluation of the minor actinide accumulation in the course of nuclear fuel burnup, ③ the assessment of nuclear data and computational codes through analyses of experimental results, and ④ the advance in experimental techniques for the reactor physics study are intensively performing within the framework of the cooperation between JUA and CEA through discussion in the Japan-France joint seminar held every year at Kyoto University or CEA. Note that the second revision of the agreement was concluded in 1999 to extend the cooperation till 2004, and a new agreement is now preparing to be concluded in 2006.

For the theme ①, several computational methods to calculate the resonance self-shielding effect in consideration of the Doppler effect and the interference effect among resonance absorption cross sections of resonant nuclides have been developed, and an assessment of the spatial effect in resonance self-shielding is

performing mainly through the comparison with the results of Monte-Carlo calculations. For the theme ②, the accuracy of burnup calculation has been examined by comparing calculated results of CEA and JUA for accumulated transuranic elements through the benchmark problem prepared on the basis of post irradiation experiments. For the theme ③, the Monte-Carlo calculation has been utilized to assess the effect of difference in the nuclear data library between Japan and France, and a study is performing to develop a computational method to obtain the adequate sensitivity coefficient and the methodology for the sensitivity analysis. For the theme ④, the information exchange and discussion on the various experimental techniques including the reactor noise experiment, the neutron flux and power distribution measurement are ongoing in order to upgrade the experimental technique for establishing reactor physics for the development of next generation reactors. Therefore, the information exchange is not limited only in the R&D area for next generation light-water reactors, but it also includes the area such as the accelerator driven subcritical reactor (ADSR), for which an experimental project is underway at Research Reactor Institute, Kyoto University.

10. KEY WORDS

<u>(1) Next Generation Light-Water Reactor</u>	<u>(2) Reactor Physics</u>	<u>(3) Self-Shielding Effect</u>
<u>(4) Minor Actinide</u>	<u>(5) Nuclear Data</u>	<u>(6) Neutronics Calculation</u>
<u>(7) Accelerator Driven Subcritical Reactor (8) Experimental Technique</u>		

(CONTINUE TO NEXT PAGE)

11. REFERENCES

AUTHORS, TITLE OF ARTICLE	JOURNAL, VOLUME-NUMBER,PAGES CONCERNED, YEAR
C. H. Pyeon, “Preliminary Study on ADSR by Using FFAG Accelerator in KUCA”	Proc. GLOBAL 2003, Atoms for Prosperity: Updating Eisenhower’s Global Vision for Nuclear Energy, pp.2193-2200, New Orleans, Louisiana, U.S.A., Nov. 18, 2003.
C. H. Pyeon, “Experiments and Analyses for Relationship between Flux Tilt in Two-Energy-Group Model and First-Mode Eigenvalue Separation”	J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 40[2], pp. 171-176, 2004.
Tsuyoshi Misawa, “Research on Accelerator Driven Subcritical Reactor at Kyoto University Critical Assembly (KUCA) with the FFAG Proton Accelerator”	Proc. PHYSOR-2004, The Physics of Fuel Cycles and Advanced Nuclear Systems: Global Developments, Session 2B, Chicago, Illinois, U.S.A., April 27, 2004.
Hironobu Unesaki, “Criticality Analysis of Highly Enriched Uranium / Thorium Fueled Thermal Spectrum Cores of Kyoto University Critical Assembly”	Proc. PHYSOR-2004, The Physics of Fuel Cycles and Advanced Nuclear Systems: Global Developments, Session 5C, Chicago, Illinois, U.S.A., April 28, 2004.
Tsuyoshi Misawa, “Research on Accelerator Driven Subcritical System at Kyoto University Critical Assembly (KUCA) with the FFAG Proton Accelerator”	Fourth International Workshop on Utilisation and Reliability of High Power Proton Accelerators, Technical Session III, KAERI, Daejeon, Republic of Korea, May 18, 2004.
三澤 毅, “京都大学原子炉実験所における F F A G 陽子加速器を用いた加速器駆動未臨界炉の基礎実験”	日本原子力学会中部支部 第36回研究発表会, L2, 名古屋大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリ, 2004年12月7日.
三澤 毅, “光ファイバー検出器を用いた高速炉体系の中性子束分布の精密測定”	東京大学大学院工学系研究科 原子力専攻設立記念シンポジウムプログラム 「原子力分野の人材育成と産官学連携の在り方」, 全国共同研究部門, 東京大学, 2005 年 3 月 8 日・9 日.

1. 緒 言

現在、我が国においては、原子力発電の総発電電力量に占める割合が 30%を超える状況となっている。しかしながら、現行の軽水炉(LWR)以外の原子炉を利用した原子力発電の方式が実用化されなければ、ウラン(U)資源の可採年数は 80 年余しかないと言われている。一方、石油資源の枯渇が現実の問題として憂慮されるようになり、原油価格の高騰が世界を揺るがしている昨今、化石燃料の利用に伴う地球温暖化の抑制が巷間でしきりに論議されていることとも相俟って、原子力発電への期待感が高まりつつある。ちなみに、U燃料を原子炉中で燃焼させることにより、天然U中に 99%以上も存在する U^{238} の中性子捕獲反応を通じて生じるプルトニウム(Pu)を利用すれば、U資源を約 100 倍も有効に利用することが可能となるので、我が国では以前から原子力委員会が策定した原子力長期計画に基づいて、高速増殖炉(FBR)の開発が進められてきた。しかし、最近までは、国際的にFBRの開発を断念あるいは先送りする状況にあり、かつ、我が国でもFBRの開発が大幅に遅延する状況にあったことから、現在、第 4 世代の原子炉開発に向けた国際的な動きが活発化し、FBRの開発に向けた動きが顕著になりつつあるものの、LWR時代がかなり長期化することは避けられない情勢となっている。ちなみに、2005 年 10 月に閣議決定された原子力政策大綱において、我が国ではFBRの開発を 2050 年に実用発電炉を導入することを目標に進めるとの方針が示されている。現行LWRの寿命は 60 年とされていることから、この方針通りにことが運んでも、LWRがFBRに完全に置き換わるのは 2110 年ということになる。このような中で、核兵器への転用が懸念されるPuのストックが世界的にも増加しているため、当面はPuをLWR用の核燃料として利用し、これを原子炉内で燃焼させることによってPuを消費し、そのストックを減らそうという、いわゆるプルサーマルの路線が世界の主流となっている。ところが、Puを燃料として利用し、LWR中に装荷して燃焼させると、その使用済燃料中には、U燃料を装荷して燃焼させたときよりも遙かに多く、超長寿命で放射能毒性の強いマイナーアクチニド(MA)が蓄積することとなり、FBR等を用いた核変換処理の研究開発が行われてはいるものの、将来に負の遺産を引き継ぐことになることが懸念される。また、現行LWRの燃料増殖特性はFBRと比べものにならないほど悪いので、U資源の有効利用に若干の寄与はするものの、核燃料資源の枯渇という問題の回避に寄与することは殆どできない。

そこで、上記のような問題を少しでも緩和しようという意識の下に、フランス原子力庁(CEA)と京都大学臨界集合体実験装置(KUCA)における共同利用研究に参加する日本の大学連合(JUA)との間で 1993 年 4 月に「次世代型原子炉の物理」に関する研究協力協定が締結され、以来、主に LWR における Pu の有効利用を図ることを目的として、次世代型 LWR の炉物理を中心とした共同研究が継続的に行われてきた。本研究では、エネルギー資源問題や原子力開発政策において多くの共通点を持つフランスと日本が、Pu 燃料の利用に関連した炉物理上の諸課題を中心にして原子力の基礎的な分野で共同研究を行い、主として次世代型 LWR の設計及び運転の基盤となる炉物理計算手法及び実験手法の高度化を図ることを目指している。具体的には、(1) Pu 燃料利用炉心の反応度係数計算法の高度化、(2) Pu 燃料利用に伴って重要性が増す共鳴吸収効果計算法の高度化、(3) Pu 燃料燃焼に伴う MA

蓄積量評価法の精度向上、(4) 炉物理実験による核データ、核計算評価法等の飛躍的な精度向上、(5) 炉物理実験技術・手法の高度化、などを目標として国際共同研究を行い、原子炉の核設計や運転管理に必要な不可欠な炉物理計算手法の高度化を CEA の実験施設及び KUCA を用いた実験により検証しながら達成し、次世代型 LWR 設計の精度向上に資することを旨とするものである。

2. 研究の概要

上述したように JUA と CEA との間で「次世代型原子炉の物理」に関する日仏研究協力協定が 1993 年 4 月に締結され、日仏共同研究が開始された。この共同研究では、京都大学原子炉実験所(KURRI)、CEA のカダラッシュ研究所あるいはサックレー研究所などで、毎年、日仏交互に日仏セミナーを開催し、必要に応じて日仏技術会合を適宜追加して、双方の研究成果を持ち寄って討議を行うとともに、双方が独自に進めている最新の炉物理研究についての遂行状況や成果に関する情報交換を行い、双方の協議を通じて適宜共同研究課題を見直しつつ、研究を進める方式を採っている。そして、平成 9～11 年度には、科学研究費補助金の基盤研究(A)(2)で「次世代の炉物理に関する共同研究一次世代型軽水炉の炉物理」を研究課題として研究を行い、これを引き継ぐ形で平成 12 年度から平成 15 年度の途中まで「大学連合による次世代型軽水炉の炉物理に関する研究—フランス原子力庁との共同研究—」を行った。本研究では、これらの成果に基づき、平成 15 年度の途中から平成 17 年度に行ったものであり、① Pu 燃料の利用に伴って重要性が増すことになる共鳴吸収効果の計算法、② Pu 燃料の燃焼に伴う MA 蓄積量の評価法、③ 実験による核データ、核計算評価法等の飛躍的な精度向上に向けた取り組みを継続しつつ、④ これらの要請に見合った炉物理実験手法の開発と高度化を目標として国際共同研究を行い、炉物理設計・解析手法の高度化を CEA の実験施設及び KUCA を用いた実験により検証しながら達成して、次世代型 LWR 設計の高度化に資する基盤の構築を目指すこととした。なお、この日仏研究協力協定は当初 3 年を期限として開始されたが、1996 年に改定されて 3 年間延長されたことに引き続き、1999 年に 2 度目の改定が行われて 2004 年まで 5 年間延長されることになった。この日仏研究協力協定については 2004 年の期限を迎えるにあたり、さらに協定を 5 年間延長することについて日仏双方の研究担当者間では合意に達していたが、延長に伴う協定書案の作成を担当することになっていた CEA 側の作業が遅れたこと、かつ、協定の期間が 10 年を超えていたために CEA としては新たな研究協力協定を締結する形にしたいとの意向が働いたため、現在、新たな協定書の作成に向けた作業が進行している状況にある。ちなみに、現在、新研究協力協定書の作成作業は最終段階にあり、今年中には日仏双方が署名を行って発効する段取りとなっている。

大学連合の形で共同研究を行っている日本側としては、①については大阪大学のグループ、②については東北大学のグループ、③、④については京都大学原子炉実験所及び名古屋大学のグループが中心となり、北海道大学、武蔵工業大学、近畿大学のグループと相互に緊密な連絡を取り合いながら、フランス側とも適宜電子メールなどを利用して連絡を取りつつ研究を進めた。なお、文部科学省の革新的原子力システム技術開発公募事業の枠組

みに基づき、平成 14 年度から京都大学原子炉実験所において 5 ヶ年計画の加速器駆動未臨界炉の技術開発に関するプロジェクトが開始されることになったため、これに関連する実験研究の比重が必然的に高まることになった。また、これまでに京都大学臨界集合体実験装置(KUCA)において蓄積された炉物理実験データの解析・評価を進め、次世代型軽水炉開発の基礎となる核データ評価及び核計算コード評価に役立てるため、ベンチマークデータとして活用することを目指して研究を進めた。なお、本研究については、当初は平成 18 年度まで継続する予定であったが、幸いにも平成 18～21 年度科学研究費補助金基盤研究(A)(1)として「大学連合とフランス原子力庁による次世代型軽水炉の研究開発に関する炉物理の共同研究」（課題番号：18206095、研究代表者：代谷誠治）が新たな研究課題として採択されたため、これに引き継がれることとなった。

3. 研究 の 内 容 及 び 成 果

研究の内容及び成果については、日仏セミナーを開催して共同研究を推進してきたので、次頁以降に第 12 回から第 14 回までの日仏セミナーのプログラム及び議事録を掲載して報告に代えることとしたい。また、近々締結されることになっており、現在、調整作業が最終段階を迎えている新研究協力協定書の案を参考までに掲載しておくこととしたい。

なお、本研究のベースである 1999 年に改定された日仏研究協力協定については、平成 12 年 3 月に纏められた「次世代の炉物理に関する研究—次世代型軽水炉の炉物理—、平成 9 年度～平成 11 年度科学研究費補助金(基盤研究(A)(2))研究報告書」（課題番号:09044163、研究代表者：神田啓治）をご参照いただきたい。

12-th CEA/JUA Seminar

March 5, 2004

CEA Headquarters (Room B), Rue de la Fédération, Paris

Agenda

9:30 Opening Address from CEA
 Thank-you Address from JUA

Topic 1 : Self-Shielding and Resonance Interference Effect

1. M. Coste
 “A New Method to Account for Resonance Overlap in Multi-group Calculations”

Topic 2 : Doppler

2. T. Takeda
 “Inter-Comparison of Doppler Reactivity Coefficients for LWR UO₂ and MOX Cells and Benchmark Problem”
3. A. Santamarina and D. Bernard
 “Doppler Deterministic Calculation in MOX Fuel – Validation and Qualification of Mutual-Shielding Formalism –”

Topic 3 : PIE Benchmarks and Minor Actinide Recycling

4. A. Courcelle and A. Santamarina
 “Improvements of LWR Isotopic Ratios Prediction Using JEFF3.0 Evaluation”
5. Discussion on PIE of BWR Fuel

New Topic : Advances in Codes

6. K. Nakajima
 “Analysis of Criticality Change with Time for MOX Cores”

12:30– 14:30 Lunch

7. O. Litaize
 “Perturbation Method for Monte-Carlo Calculations in the Future Package”

Topic 5 : Experiments

8. H. Unesaki
“Criticality Analysis of High Enriched Uranium/Thorium Fuelled Thermal Spectrum Cores of Kyoto University Critical Assembly (KUCA)”
9. C. H. Pyeon
“Preliminary Study on Accelerator Driven Subcritical Reactor (ADSR) by Using Fixed Field Alternating Gradient (FFAG) Accelerator in KUCA”

16:10 Discussion on Future Cooperation

17:00 Closing Address

大学連合(JUA)ーフランス原子力庁(CEA)

「次世代原子炉の原子炉物理学に関する協力研究」

第 12 回 日仏セミナー

議事録

CEA パリ本部

2004 年 3 月 5 日

1. 日時：2004 年 3 月 5 日

2. 場所：フランス原子力庁(CEA)本部（フランス・パリ）

3. 出席者（敬称略・順不同）：

フランス原子力庁・カダラッシュ研究所	Alain Santamarina
フランス原子力庁・カダラッシュ研究所	Olivier Litaize
フランス原子力庁・サックレー研究所	Mireille Coste
フランス原子力庁・サックレー研究所	Michel Soldevilla
大阪大学・大学院工学研究科	竹田敏一
京都大学・原子炉実験所	代谷誠治
京都大学・原子炉実験所	中島 健
京都大学・原子炉実験所	宇根崎博信
京都大学・原子炉実験所	卞 哲浩
京都大学・原子炉実験所	小野知子

4. 議事：

議事に先立ち、CEA・A. Santamarina 氏より、大学連合側の参加者への歓迎の辞と、本セミナーにおける研究報告の概要について説明があった。また、大学連合側を代表して、京大炉・代谷氏より感謝の辞が述べられた。

(1) APOLLO-2 コードにおける共鳴干渉効果の取り入れについて

CEA・M. Coste 氏より、CEA が開発した APOLLO-2 コードに対する共鳴干渉効果の取り入れに関する発表が行われた。ここでは、APOLLO-2 コードにおける共鳴自己遮蔽効果の評価法、非均質-均質等価原理の適用、反復法に基づく現行の共鳴干渉効果の取扱いについて説明があった後、新しく開発された共鳴干渉効果の取扱い法について説明があった。すなわち、複数の共鳴核種を含む均質媒体における減速方程式を詳細群（～10000 群）を用いて数値的に解くことにより、より直接的に共鳴干渉効果を考慮するものであり、基準計算値と比べて、反応率の再現性が向上したことが報告された。

(2) 軽水炉 UO₂ 燃料及び MOX 燃料に対するドップラー反応度計算結果の比較とベンチマーク問題について

阪大・竹田氏より、本協力研究の枠内で解析が進められているドップラー反応度ベンチマークについて、燃料ペレット内温度分布の効果を取り入れた解析として、モンテカルロコード MVP を用いて行われた解析結果が報告され、従来の平均温度を用いる解析ではドップラー反応度が 3～7% の過大評価となることが報告された。この結果に基づいて、燃料ペレット内の温度分布を考慮した過渡変化解析に関するベンチマーク問題が提案された。

(3) 決定論的手法に基づく MOX 燃料ドップラー反応度の解析について

CEA・A. Santamarina 氏より、MOX 燃料のドップラー反応度の解析について、CEA にある研究炉 MINERVE を用いた燃料加熱実験によるドップラー反応度測定の結果、及び、これに対する APOLLO-2 コードを用いた解析結果との比較が報告された。そして、UO₂ 燃料に比べて、MOX 燃料では実験値と計算値との一致が悪いこと、成分毎の解析を行った結果やモンテカルロ計算コード TRIPOLI4 を用いた解析結果との比較などにより、MOX 燃料での過大評価は Pu-240 と U-238 の共鳴干渉効果に起因することが報告され、MOX 燃料のドップラー反応度評価においては共鳴干渉効果を正確に考慮することが重要であることが指摘された。

(4) JEFF3.0 評価済みデータによる軽水炉核種組成評価値の改善について

CEA・A. Santamarina 氏より、軽水炉燃料の燃焼に伴う核種組成変化に対して JEFF3.0 評価済み核データライブラリーを使用することにより、核種組成の評価値が改善することが報告された。具体的には、照射後実験の解析において、これまで計算による予測値が大きくはずれていた種々の核種について、JEFF3.0 を用いることにより、計算値と実験値との一致が大幅に改善することが示された。また、BWR 使用済み燃料に対する照射後実験を実施する必要性について意見交換が行われた。

(5) MOX 炉心の臨界性に対する経時変化について

京大炉・中島氏より、Pu-241 の崩壊に伴う MOX 炉心の臨界性に対する経時変化について、日本原子力研究所(JAERI)にある臨界実験装置 TCA での MOX 炉心における実験結果と、JENDL-3.2 及び 3.3 を用いた解析結果との比較が報告され、Am-241 や Pu-241 の断面積データの精度が不十分な可能性があることが指摘された。

(6) 次世代核特性評価コード DESCARTES におけるモンテカルロ摂動計算手法について

CEA・O. Litaize 氏より、CEA における次世代核特性評価コード DESCARTES の開発の一環として行われている、モンテカルロ摂動計算手法の開発及び評価結果が報告された。本報告では、相関サンプリング法による摂動計算手法の説明と、単純な体系における評価計算結果が示された。

(7) 京都大学臨界集合体実験装置 KUCA におけるウラン-トリウム燃料装荷熱中性子体系の臨界性解析について

京大炉・宇根崎氏より、KUCA におけるウラン-トリウム燃料装荷臨界実験を対象として行われた臨界性解析の結果が報告された。具体的には、ウラン対トリウム比、ウラン対水素比を系統的に変化させた 7 種類の炉心について、3 種類の核データライブラリ、JENDL-3.3、ENDF/B-VI.8、JEFF3.0 を用いて行われた解析結果の相互比較が報告され、ウラン系よりもウラン-トリウム系の方が、核データライブラリ間の差違が大きいとの指摘があった。

(8) FFAG 加速器と KUCA を組み合わせた加速器駆動未臨界炉(ADSR)の基礎研究について

京大炉・卞氏より、京都大学原子炉実験所で進められている ADSR 基礎実験計画として、FFAG 加速器、KUCA と FFAG 加速器を結合させた ADSR 模擬体系の説明、及び、14MeV 中性子源と KUCA を組み合わせた実験の成果に関する報告があった。

Seminar on NEXT GENERATION REACTOR PHYSICS
Within the FRAMEWORK of the COOPERATION between
NUCLAER ENERGY DIRECTORATE of CEA and the
JAPANESE UNIVERSITY ASSOCIATION

February 4, 2005

KUCA Meeting Room, Research Reactor Institute, Kyoto University

Agenda

10:00– Opening Addresses

10:05– H. Unesaki
“CEA–JUA Collaboration : Overview of the Past Seminars and Efforts”

Topic 5 : Experiments and Experimental Techniques

10:15– S. Shiroya
“Present Status of the ADS Studies at Research reactor Institute, Kyoto University”

10:30– Technical Tour to FFAG Proton Accelerator Facility and KUCA

11:30– H. Unesaki
“KUCA Critical Experiments on U-Th FUEL Systems and Assessment of TH-232
Cross Section Evaluations through Criticality Analysis”

12:00–13:00 Lunch Break

Topic 2 : Doppler Reactivity Coefficient

13:00– D. Bernard and A. Santamarina
“CEA Results of the Joint Doppler Benchmark on LWR Transient Situations”

13:30– A. Sawada and T. Takeda
“Recent Study on Doppler Coefficient Calculation at Osaka University”

Topics on Advances in Codes

14:00– A. Mazollo
 “Properties of Neutron Trajectories in Bounded Domains”

14:30–14:45 Break

Topic 4 : PIE Benchmark and Minor Actinide Recycling

14:45– O. Litaize, D. Bernard and A. Santamarina
 “JEFF3.0 Prediction of High-Burnup Fuel Inventory”

O. Litaize, D. Bernard and A. Santamarina
“JEFF3.1 Evaluations for LEU Reactivity and Minor Actinide Build-up Improvement”

Topic 5 : Experiments and Experimental Techniques

15:30– K. Nakajima
 “Analysis of Power Profile in JCO Criticality Accident Using Quasi-Steady-State Method”

16:00– J. P. Hudelot
 “Technique and Methodology for Measuring Spectral Indices with Miniature Fission Chambers – Sensibility to Calibration Data”

16:30–17:00 Discussion on the Future Joint Study

17:00 Closing Address

大学連合(JUA)－フランス原子力庁(CEA)

「次世代原子炉の原子炉物理学に関する協力研究」

第 13 回 日仏セミナー

議事録

京都大学原子炉実験所・KUCA 会議室

2005 年 2 月 4 日

1. 日時：2005 年 2 月 4 日（金）10:00～17:30
2. 場所：京都大学原子炉実験所 臨界集合体棟会議室
（大阪府泉南郡熊取町朝代西 2-1010）
3. 出席者（敬称略、順不同）：

フランス原子力庁・カダラッシュ研究所	Olivier Litaize
フランス原子力庁・カダラッシュ研究所	Jean-Pierre Hudelot
フランス原子力庁・カダラッシュ研究所	David Bernard
フランス原子力庁・サックレー研究所	Alain Mazollo
大阪大学・大学院工学研究科	竹田敏一
大阪大学・大学院工学研究科	澤田彰子
名古屋大学・大学院工学研究科	山根義宏
京都大学・原子炉実験所	代谷誠治
京都大学・原子炉実験所	宇根崎博信
京都大学・原子炉実験所	中島 健
京都大学・原子炉実験所	三澤 毅
京都大学・原子炉実験所	卞 哲浩
京都大学・大学院エネルギー科学研究科	Morgan Hervault

4. 議事

議事に先立ち、京都大学・代谷所長より、フランス原子力庁(CEA)側の参加者への歓

迎の辞と、本協力研究の枠組みについて説明があった。また、CEA 側を代表して、O. Litaize 氏より感謝の辞と、CEA における炉物理関連部門の動向について説明があった。

(1) 大学連合-CEA 協力研究の経緯と成果について

京大炉・宇根崎氏より、大学連合—CEA 協力研究の経緯と、これまでに開催された日仏セミナーの内容、並びに、協力研究の主要な成果が紹介された。

(2) 京都大学原子炉実験所における ADS 関連研究の現状

京大炉・代谷所長より、京大炉における ADS 関連研究の現状として、KUCA における未臨界実験の成果、FFAG 加速器の建設状況について説明が行われた。また、引き続き、FFAG 加速器の施設見学が行われ、マグネット設計に関する質疑応答が行われた。

(3) KUCA における U-Th 系臨界実験と臨界性解析に基づく Th-232 断面積の評価

京大炉・宇根崎氏より、KUCA における U-Th 系熱中性子体系に関する臨界実験の紹介と、臨界性解析に基づく、評価済み核データライブラリ中の Th-232 断面積の積分評価結果が報告された。ここでは、Th-U 混合単一領域炉心の解析結果として、JENDL-3.3 を基準断面積として、Th-232 断面積のみを JENDL-3.3、ENDF/B-VI、JEFF3.0 と変化させた場合に、最大で 0.4%程度の実効増倍率の変化が見られることが報告された。また、Th-黒鉛テストゾーン付き炉心の臨界性を JENDL-3.3、ENDF/B-VI、JEFF3.0 を用いて解析した結果として、実験と解析との一致が大幅に改善されたこと、テストゾーン中の Th 比率が増加するに従ってライブラリ間の不一致が拡大することが報告された。これに対し、スペクトルインデックス測定実験の必要性に関する質疑応答、JEFF3.0 中の Th-232 断面積の問題点に関するコメントなどがあった。

(4) 軽水炉過渡変化時におけるドップラー反応度係数ベンチマークに関する CEA 解析結果

CEA・D. Bernard 氏より、本協力研究で進められているドップラー反応度係数ベンチマーク問題に関する CEA 側の解析結果が報告された。ここでは、ベンチマーク問題のうち、BWR 過渡変化問題について、APOLLO-2 コード及び TRIPOLI-4 コードを用いた解析結果が紹介され、APOLLO-2 コードで用いられている確率テーブル法の検証、温度分布プロファイルの違いによる反応度及び反応率の違いについて説明が行われた。また、大学連合側による MVP コードを用いた解析結果との比較検証を行い、共著論文を作成することが提案され、了解された。

(5) 大阪大学におけるドップラー反応度係数計算法の最近の成果

大阪大学・澤田氏より、大阪大学におけるドップラー反応度係数計算法に関する研究成果として、日仏共同研究ベンチマーク問題の解析結果が報告された。ここでは、最近数年間における研究成果の紹介と、RESPLA コードと NJOY コードを組み合わせた新しい計算フローに基づく解析結果が紹介され、共鳴領域のエネルギー群を 368 群あるいは 440 群に細分化することと、Stoker & Weiss 法による領域依存実効断面積計算により、MVP コードによる基準解との一致が改善されたことが報告された。また、この計算手法を過渡変化時ドップラー反応度係数計算ベンチマークに適用する予定であることが説明された。この発表に対し、MVP コードの計算精度、共鳴領域エネルギー群数の決定に関する質疑応答があった。また、共著論文執筆に向けて日仏間で情報交換を引き続き進めることが了解された。

(6) 境界付き空間領域における中性子軌跡の特性

CEA・A. Mazollo 氏より、燃料最密充填問題に関連した、中性子軌跡の確率分布に関する研究成果が報告された。ここでは、理論的な考察及び数値実験に基づく、中性子軌跡確率分布の表記と、モンテカルロコードへの適用について報告があった。また、関連して、9 月に開催される TRIPOLI-4 コードワークショップの案内があった。

(7) JEFF3.0 と JEF2.2 の比較：JEFF3.1 のための改善

CEA・O. Litaize 氏より、軽水炉核特性評価における JEF2.2、JEFF3.0 のパフォーマンスと、JEFF3.1 を念頭に置いた Am 及び Cm に対する改善提案が報告された。ここでは、JEF2.2 と JEFF3.0 の比較による後者の優位性について、軽水炉の反応度（ピンセル燃焼、MISTRAL 実験解析）と燃焼特性の評価結果が紹介された。また、燃焼特性のうち、同位体組成については、U-235、Pu-239、Pu-241 及び Eu-154, Eu-155 の改善が大きな影響を及ぼしており、PIE 解析結果の改善をもたらしていること、一方で、低濃縮ウラン体系の臨界性の過小評価、Pu-239 生成量の過大評価、EOC における Am-241 の過大評価が依然として観察されていることが報告された。これらの問題点は、JEFF3.1 において、U-238（捕獲断面積）、Am-241（捕獲断面積、Am-242m 分岐比）、Cm-245（捕獲断面積）の再評価を行うことにより解決される見込みとのことである。

(8) 準静的手法に基づく JCO 臨界事故時出力履歴の解析

京大・中島氏より、準静的手法に基づく JCO 臨界事故時出力履歴の解析結果が報告された。ここでは、挿入された反応度が瞬時にフィードバック反応度により相殺されるという準静的モデルを用い、JCO 臨界事故の解析を実施し、初期挿入反応度及び冷却水流量として 1.5\$及び 0.4L/min が best estimate であること、最初の 100 秒間はボイド反応度

が重要であり、その後は蒸発による反応度変化が主体となること、蒸発による熱除去は大きな影響を及ぼしていないことが報告された。

(9) スペクトル指標測定：不確かさの解析と校正データの感度

CEA・J.-P. Hudelot 氏より、CEA での炉物理実験におけるスペクトル指標測定として、核分裂率比測定に関する実験手法、検出器校正手法、不確かさの評価が報告された。ここでは、CEA カダラッシュ研究所における核分裂率測定の概要説明、核分裂率比測定結果に対する不確かさの評価式と評価例、検出器校正用標準中性子場に対する不確かさの検討結果と、実験データの現状に関する報告が行われた。

(10) 今後の協力研究に関するディスカッション

今後の研究協力についてディスカッションが行われ、下記のことを了解された。

- ・現在の協定を早急に延長することが必要。京大・代谷教授と CEA・Santamarina 氏で調整を進めることとする。
- ・協定の延長にあたっては、研究項目（"Topics"）を記載している附属書 A（Annex A）を書き換える必要がある。これまでの Annex A では、各研究項目について、詳細な記述がなされていたが、今回の改訂では、たとえば「セル及び炉心計算手法並びに核データ」、「燃焼計算及び TRU 研究」、「実験技術に関する情報交換」といった、より大枠での研究項目の下に、個別のテーマを並べるという書き方として、研究動向の変化に柔軟に対応できるようにする。
- ・Doppler ベンチマークについては共著論文の作成を念頭におき、阪大・竹田教授と CEA・Santamarina 氏、Litaize 氏との間で情報交換を進める。

14-th CEA/JUA Seminar

February 23, 2006

CEA Headquarters (Room B), Rue de la Fédération, Paris

Agenda

9:30 Opening Address

Topic 1 : Cell and Core Calculation Methodology and Nuclear Data Libraries

1. Alain SANTAMARINA
 “SHEM : A New Energy Mesh for Accurate Multi-group Transport Calculations”
2. Toshikazu TAKEDA
 “Calculation Methods of Effective Cross Section for Doppler Effect”
3. Hironobu UNESAKI (presented by K. Nakajima)
 “Criticality Analysis of Uranium Fueled Thermal Spectrum Cores of Kyoto University
 Critical Assembly using JENDL-3.3, ENDF/B-VI.8 and JEFF3.1 Libraries”
4. Richard SANCHEZ and Igor ZMIJAREVIC
 “Development of an Efficient MOC Method for the APOLLO2 Code”
5. Claire GAUDARD
 “Analysis of the BASALA Experiments Using the New APOLLO2-MOC Method”

12:30 – 14:30 Lunch

Topic 3 : Information Exchange on Experimental Techniques

6. Yoichiro SHIMAZU
 “Estimation of Temperature Coefficients of a PWR Using Dynamic Identification
 Method”
7. Patrick BLAISE and P. FOUGERAS
 “Peak Check Measurements for Gd Pins in the BASALA and FUBILA Experiments”
8. Daniel BERETZ and Christophe DESTOUCHES (presented by P. Blaise)
 “Determination of Adjusted Neutron Spectra in MUSE Configuration by Unfolding

Techniques”

16:00 Discussion on Future Cooperation

17:00 Closing Address

**MINUTES of the
14-th Seminar on NEXT GENERATION REACTOR PHYSICS
within the FRAMEWORK of the COOPERATION between
JAPANESE UNIVERSITY ASSOCIATION and the
NUCLEAR ENERGY DIRECTORATE of CEA**

CEA Headquarters

February 23, 2006

Japanese Delegation

Prof. S. SHIROYA	Kyoto University
Prof. T. TAKEDA	Osaka University
Prof. Y. SHIMAZU	Hokkaido University
Prof. K. NAKAJIMA	Kyoto University
Mr. T. IJIRI	Kyoto University

French Delegation

Dr. A. SANTAMARINA	DEN/DER/SPRC
Dr. C. GAUDARD	DEN/DER/SPRC
Dr. P. FOUGERAS	DEN/DER/SPE _x
Dr. P. BLAISE	DEN/DER/SPE _x
Dr. R. SANCHEZ	DEN/DMT/SERMA
Dr. I. ZMIJAREVIC	DEN/DMT/SERMA

WELCOME ADDRESS

On behalf of CEA, A. SANTAMARINA expressed his happiness to organize this technical meeting in the framework of the cooperation between the Japanese University Association (JUA) and the Nuclear Energy Division of CEA on the Physics of the Next Generation of Reactors especially Light Water Reactors. He welcomed the Japanese delegation for attending this meeting and expressed his expectation for a soon signing of the new Cooperation

Agreement. He recalled that the collaboration (set up in 1999) enabled fruitful exchange on self-shielding methods, Doppler calculations, P.I.E analyses, nuclear data, experimental techniques, and allowed the publication of common papers.

TOPIC 1 : Cell and Core Calculation and Nuclear Data Libraries

A. SANTAMARINA presented “the optimized mesh SHEM (Santamarina ~~H~~faiedh ~~E~~nergy ~~M~~esh) for accurate transport calculations”. SHEM was developed to drastically reduce neutronics calculations errors due to multi-group approximations. A fined mesh was optimized to avoid the utilization of self-shielding models : the whole resonances of major and minor Actinides, main Fission Products and LWR absorbers (^{109}Ag and ^{107}Ag , ^{115}In , Hf isotopes, ^{155}Gd ...) are described up to 23eV. Simultaneously, errors due to mutual shielding effect are cancelled, such as $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ and $^{238}\text{U}/^{240}\text{Pu}$ resonance overlap at 21eV or $^{177}\text{Hf}/^{179}\text{Hf}$ at 5.8eV. The SHEM mesh is also built to improve slowing down calculations and resonance scattering in coolants or structural materials (^{16}O , ^{23}Na , ^{27}Al , ^{56}Fe , ^{58}Ni , ^{55}Mn).

A particular attention is paid to threshold reactions, such as ^{238}U first inelastic level and fission (100keV and 1 MeV energy range). Moreover, the lethargy width of SHEM groups is always thinner than 0.2, which allows accurate slowing down calculations in Fast Breeder Reactors.

T. TAKEDA presented a recent study on “Doppler coefficient calculation”. The Stoker & Weiss method was used to account for space-dependent self-shielding. An LWR Benchmark at nominal conditions was calculated with a standard fuel temperature and a higher temperature (respectively 600°C and 900°C average fuel temperature). Calculations were performed for both the uniform average temperature and the actual temperature profile. Three deterministic calculations (Dancoff, Stoker-Weiss and Multiband method) were compared to a reference calculation based on the continuous-energy Monte Carlo code MVP. The Doppler reactivity worth is overestimated by the deterministic methods : 1.2% to 5.0% in UOX fuel and 3.6% to 5.9% in MOX fuel. This Doppler overestimation is increased by about 1% in the realistic case using the temperature profile. Thus, this study points out that Stoker-Weiss method produces reasonable self-shielding factor and Doppler coefficient (within 5% accuracy).

A qualification work against FCA Doppler reactivity measurements was presented. Sensitivity calculations have shown that the measured temperature effects are not very sensitive to ^{238}U epithermal resonant capture. Therefore this FCA experiment is not suited for thermal reactors and could be relevant only for Doppler qualification in HCLWRs.

K. NAKAJIMA presented the paper submitted to the PHYSOR2006 Conference by H. UNESAKI “Criticality Analysis of Uranium Fueled Thermal Spectrum Cores of Kyoto University Critical Assembly using JENDL-3.3, ENDF/B-VI.8 and JEFF3.1 Libraries”. Results of criticality analysis of uranium fueled, polyethylene-moderated/reflected thermal spectrum

cores at KUCA facility were shown. Calculations of the various critical cores performed by MVP Monte Carlo code pointed out that the use of recent international libraries (JENDL3.3, ENDF/B-VI.8, JEFF3.1) allows k_{eff} prediction within $\pm 500\text{pcm}$. However, enrichment dependence and moderation ratio dependence ($\text{H}/^{235}\text{U}$ from 34 to 316) of the C/E values have been observed. This C/E comparison demonstrated that the JEFF3.1 library is the unique library to handle accurately both ^{235}U -enrichment and moderation ratio variations.

R. SANCHEZ presented the “Development of an efficient MOC method for the APOLLO2 code”. After summarizing the MOC resolution of the transport equation, the main advantages were highlighted : full 2D unstructured geometries (for both assembly and core applications), anisotropic scattering, lower computational complexity. The powerful DP_N synthetic acceleration method was described. Examples of APOLLO2-MOC calculations were shown on various reactor types : BWR, GT-MHR (including coated fuel particles), RJH irradiation reactor. Comparison to reference continuous-energy Monte Carlo TRIPOLI4 results emphasized the reliability and the accuracy of APOLLO2-MOC results.

C. GAUDARD presented the “Analysis of the BASALA experiments using the new APOLLO2-MOC” method. She reminded that this experiment in Eole aims at the mock-up of BWRs 100% MOX loaded with 9x9 assemblies. Characteristics of BASALA-Hot cores (simulation of nominal conditions with 40% void) and BASALA-Cold cores were summarized. The APOLLO2.8/MOC calculation scheme was described : first step in an assembly multi-cell geometry using SHEM-281g for self shielding corrections and flux spectrum calculation, and second step in a refined exact 2D geometry using the MOC method with the 26-group collapsed cross sections. Reactivity of the experimental critical cores is overestimated by +500pcm and +700pcm using JEF2 nuclear data respectively in the Hot and Cold cores. Implementing the JEFF3.1 library in these 100% MOX cores increases the calculated k_{eff} by 100pcm. The reactivity worth of Gd burnable poison pins and cruciform B4C control rod is perfectly predicted by APOLLO2; the reactivity worth of Hf control rod is over-predicted by $1.8\% \pm 0.1\%(1\sigma)$. Measured Void worth (40%→70% void) looks slightly overestimated by APOLLO2 : $2.8\% \pm 0.2\%$. Using the APOLLO2/MOC scheme, the pin/pin power map is always predicted within 2% (in agreement with spectro-gamma uncertainty $1.0\%(1\sigma)$).

TOPIC 3 : Information Exchange on Experimental Techniques

Y. SHIMAZU presented an “Estimation of temperature coefficients of a PWR using dynamic identification method”. The study pointed out that, from the measurements and a Doppler coefficient guess, the Moderator Temperature Coefficient (MTC) can be derived within the required target accuracy. Y. SHIMAZU expressed his interest to obtain some experimental values from EdF reactors to demonstrate the relevance of the proposed method.

P. BLAISE presented the “Peak check measurements for Gd pins in the BASALA and FUBILA experiments”. The presentation described in detail the normalization process applied to merge two integral gamma-scanning maps made on different fuel types. P. BLAISE focused on the reasons of such a normalization, the important steps to get the correction factors such as gamma self-absorption and dead time effect of the electronics, and the uncertainty propagation from the raw data to the final results. The method has been illustrated through example on the BASALA program.

On behalf of D. BERETZ and C. DESTOUCHES, P. BLAISE presented the “Determination of adjusted neutron spectra in MUSE configuration by unfolding techniques”. The presentation showed the methodology applied for the first time to an Accelerator Driven System mocked up in MASURCA and pointed out the influence of the external source on the adjustment.

FUTURE WORK

- a) JUA should carry out the reference calculations of the Doppler Benchmark using the MVP code in the BWR transient cases, and compare to the CEA results. CEA should synthesize the CEA/JUA result comparison. A joint paper will be submitted to the next Mathematics and Computation conference M&C2007.
- b) The effect of anisotropic scattering in PWRs (including the baffle and steel reflector problem) and BWR assemblies was discussed. It was decided that Professor TAKEDA is in charge to define a specific JUA/CEA Benchmark on anisotropic scattering in LWRs.
- c) The use of the MTC measurement method (proposed by Y. Shimazu) in French PWRs should be investigated.

NEXT SEMINAR

The next CEA/JUA Meeting should be held in Japan in November 2006.

DEN 1356
C6409

CEA

KURRI

**COOPERATION AGREEMENT
IN THE FIELD OF R & D
OF THE PHYSICS OF NEXT GENERATION
REACTORS ESPECIALLY LIGHT WATER REACTORS**

Between

The Commissariat à l’Energie Atomique, hereafter called CEA, having their principal office at 31-33, rue de la federation, Paris 15ème (FRANCE), and represented by Mr. Philippe PRADEL, Director of Nuclear Energy Division,

and

Kyoto University Research Reactor Institute, hereafter called KURRI, having their principal office at Kumatori-cho, Sennan-gun, OSAKA 590-04 (JAPAN), and represented by Prof. Seiji SHIROYA, Director of KURRI.

It being understood that the Joint Study Committee for Critical Assembly, KUCA (Kyoto University Critical Assembly) having its activities under the Advisory Committee for Director of KURRI chaired by Prof. Kaichiro Mishima will take care of the contact between CEA and the “Japanese University Association (JUA) on Reactor Physics for Light Water Reactors of Next Generation”

Hereinafter referred to as the “parties” or a ”party”.

WITNESSTH

WHEREAS CEA has had a long term of experience in the research and development of advanced reactor physics and fuel cycle physics,

WHEREAS KURRI has had a wide experience in the research of reactor physics experiment and analysis related to KUCA,

WHEREAS, more particularly, CEA on the one hand and KURRI in close association with other Japanese universities (notably with the Osaka University) on the other hand have been carrying R&D works on physics of next generation reactors, especially “ high conversion light water reactors” (HCLWR),

WHEREAS CEA and KURRI consider that they have complementary experiences and know-how in these areas and therefore are willing to enter into cooperation in the field of R&D of next generation reactors,

WHEREAS on June 5 1991, the Japanese Government and the French Government have concluded a scientific and technical cooperation agreement which includes intellectual property provisions to be applied in scientific and technical cooperation between Japan and France,

WHEREAS on April 16 1993, the parties have signed a cooperation agreement in the field of R&D of the physics of next generation reactors especially HCLW reactors. Two amendments to the cooperation agreement have extended the cooperation until April 15 2004 by replacing the word “HCLW (High Conversion Light Water)” to “LW (Light Water)” in consideration of R&D trends.

WHEREAS such a cooperation fits into the framework of peaceful applications of nuclear energy and will be beneficial for the promotion of nuclear energy utilization both in France and Japan.

NOW THEREFORE in consideration of the mutual covenants set forth herein the parties agree as follows.

ARTICLE 1 – OBJECTIVE OF THE AGREEMENT

The objective of this agreement is to set out the terms and conditions under which the parties shall collaborate on a joint programme on research and development on the physics of the next generation reactors (hereinafter referred to as “the reactors”), more particularly the LW reactors.

ARTICLE 2 – JOINT PROGRAMME

- 2.1 The parties shall fund and carry out an agreed joint programme of exchange of information, assignment of personnel, joint meetings and visits on R&D of the Reactors. Such programme is divided into three “priorities”, each of them corresponding to a specific study topic.

The joint programme and the responsibilities of each party in its implementation are described in Annex 1.

The joint programme may be amended or renewed by the coordinators mentioned in Article 4. Such modifications shall be subject to amendments to annex of this agreement.

- 2.2 In the framework of the joint programme, subject to the rights of third parties, namely to the obligations entered into by either party under any other agreement and to the applicable laws, regulations and licence requirements in force in the country of each party, the parties shall make available to each other, to such extent as may be agreed, patented and non-patented information concerning the Reactors which is at their disposal, more particularly in order to provide an effective comparison between the existing R&D works of each party.

- 2.3 The Common language shall be English.

ARTICLE 3 – FINANCING

- 3.1 The collaboration is understood to be on the basis of best efforts on both parties and is subject to the yearly availability of facilities, staffing and financing necessary to carry out

the above tasks.

3.2 The joint programme is to be on the basis of own self-financing. Consequently, neither party may charge the other for work done in his own country. Materials and facilities shall be provided free of charge and each party shall cover the costs of its own personnel. However for expenses of assigned staff for long term periods, provisions of Article 10 shall apply.

ARTICLE 4 – COORDINATION

Each party will designate a coordinator who will be responsible for leading and coordinating the joint programme.

The coordinators will meet in principle once a year alternately in France and Japan.
The chair and secretariat of the meeting will be taken by the party of the country where the meeting is being held.

The date, agenda and practical details of the meetings will be fixed upon mutual agreement by the coordinators.

The participants will be the two coordinators and, when necessary, correspondents responsible for the working groups and experts.

During these meetings, the coordinators will review the overall cooperative activities under the joint programme and their implementation.

ARTICLE 5 – WORKING GROUPS

If necessary, working groups may be formed for ad-hoc periods on defined topics.

Each party will designate a topic area correspondent responsible for each working group formed. The correspondents shall be responsible for keeping their coordinators informed of the activities of their working group.

ARTICLE 6 – RIGHTS OF USE – COMMUNICATION TO THIRD PARTIES

6.1 Each party will have, for its own research and development activities only on nuclear reactors and in its own country, a free right of use of the results arising out of the joint programme, data and information communicated by the other party.

6.2 Communication of information to third parties:

Except as provided to the contrary, the results arising out of the joint programme, the data, and other information which the parties communicate mutually must be considered confidential and may not be communicated to third parties by the party which received them, without proof that they are already in the public domain or without a prior agreement between the parties.

However, each of the parties has the right to communicate the results arising out of the joint programme and information received from the other party in its own country, to organisations competent in reactor safety, with unlimited free use within the framework of their national activities, after the party has obtained the respect of the latter for the confidential nature of such information. Both parties must agree on the criteria by which an organization shall be considered “competent” in reactor safety.

6.3 Moreover, in consideration of the cooperative links between KURRI and other Japanese universities, as mentioned in the Preamble, KURRI may transmit the results arising out of the joint programme and CEA’s information to such universities involved in this cooperation and identified upon mutual agreement on a confidential and need-to-know basis and for R&D purposes only.

ARTICLE 7 – INDUSTRIAL PROPERTY

7.1. Unless otherwise agreed upon in this agreement, the provision of the Annex “Intellectual Property” of the French-Japanese cooperation agreement of June 5 1991 mentioned in the Preamble shall apply to this agreement.

7.2 Background Information

Each party shall retain all the intellectual property rights attached to its background information.

Apart from the right to use the background information provided by one party to the other party to the extent necessary to perform the Program and except as may be expressly granted, no licenses nor any other rights are granted on such background information to the receiving party.

Each party may use free of charge the background information of the other party solely for R&D.

Any other use of such background information, such as for industrial and commercial use, shall require the party's prior and written consent and will be subject to specific agreements.

7.3. Results

7.3.1 The results generated by a single party in the course of the cooperation is the ownership of that party.

This party is entitled to grant any third party rights to the results, and is free to file applications for patents at its own name and its own cost on any territory without any prior consent of the other party.

Nevertheless, the other party shall be granted a free and non-transferable right of use on the results for its own research and development activities in its own country.

Any other use of the results, such as for industrial and commercial use, shall be subject to a specific agreement to be concluded between the parties.

7.3.2 If the parties jointly carry out work generating results and if their respective share of work cannot be ascertained, they shall have joint ownership of these results.

7.3.3 The parties agree to jointly apply to obtain and/or to maintain the relevant intellectual property rights and shall strive to set up among themselves appropriate agreement in order to do so.

Each party shall be granted a free and non-transferable right of use to the results for its own research and development activities in its own country; any other use, such as for

industrial and commercial use, shall be subject to mutual agreement of the parties.

ARTICLE 8 – LIABILITY FOR INFORMATION

- 8.1 Information provided by either party under this agreement shall be accurate to the best of the party's knowledge and belief but no warranty, expressed or implied, is given by the party that the information is, in fact, accurate.
- 8.2 The parties hereby agree that the use of such information by a party receiving it, or by any person to whom that party may disclose such information in accordance with the provisions of Article 6, shall be entirely at the receiving party's risk and each party hereby agrees to indemnify the other party against any claim made by any person arising from the use of such information (including claims relating to the infringement of patent rights) by itself or by any person to whom it disclose such information.

ARTICLE 9 – LIABILITY FOR ACCIDENTS

- 9.1 Damages to the staff of each party
- 9.1.1 Each party takes in charge of the insurance coverage for its own staff in accordance with applicable legal requirements for occupational injuries and occupational diseases. As a consequence, each party must fulfil the required formalities and sustain all the costs, if any, involved in the insurance policies purchased to cover its own staff against the risks.
- 9.1.2 Each party shall inform the other party of any incident or damage occurred to the staff of such other party in the course of any work by the staff of such other party received in order to allow such other party to proceed to the declarations required by law within the prescribed time.
- 9.1.3 Each party is liable to damages caused by its staff to the staff of the other party in compliance with the applicable law.
- 9.2 Damage to the other party's properties

9.2.1 Each party is liable to support, without any right of recovery against the other party, the damages caused to its own property by the staff of the other party when the staff thereof has been put at its disposal except in case of deliberate offence or gross negligence of the said staff.

9.3 Third party liability

In accordance with the appropriate local regulations, each party shall remain liable for damages to third parties caused by its own staff put at the disposal of the other party.

9.4 Nuclear liability

9.4.1 Each party shall be solely liable for any damage of any nature caused by a nuclear incident occurring within its own premises, pursuant to the conditions and limits provided by the applicable local regulation.

9.4.2 As a consequence, each party agrees to indemnify and hold the other party and its staff harmless from any and all actions, claims and demands which may be brought against them in respect to any damage, liabilities or costs in connection with any nuclear incident arising out of or resulting from the performance of this agreement inside its territory.

9.4.3 Each party shall comply with the foregoing requirements by providing financial protection through governmental indemnities, private insurance, or any other financial protection, in sufficient amounts in accordance with the relevant applicable law of its country.

9.4.4 Each party shall have a right of recourse for nuclear incident within one year following the termination of this agreement, if the cause of incident arises out or results from gross negligence of the other parties or any of its employees, including but not limited to the violations of security regulations. Insurance against such recourse is prohibited, and may entitle the other party to terminate this agreement.

9.4.5 A “nuclear incident” means any occurrence or succession of occurrences having the same origin which causes damage, provided that such occurrence or succession of occurrences, or any of the damage caused, arises out or results either from the radioactive properties, or a combination of radioactive properties with toxic, explosive, or other hazardous properties of nuclear fuel or radioactive products or waste or with any of them, or from ionizing radiations emitted by any other source of radiation inside a nuclear installation.

ARTICLE 10 – SITUATION OF ASSIGNED EMPLOYEES

10.1 Assigned employees shall continue to be employees of the providing party during their attachment and their salaries shall be paid by the providing party except for any expenses incurred by the assigned employees in fulfilment of official duties of the receiving party shall be borne by that party.

In particular it is agreed that:

- costs for travelling of assigned employees to the receiving party's establishment will be borne by the assigning party,
- accommodation costs of the assigned employees will be borne by the receiving party.

10.2 Public holidays granted to the assigned employees shall be those allowed by the receiving party.

10.3 During their attachment, the assigned employees shall be subject to the rules and regulations (including security regulations) of the receiving organisation and shall comply with any instructions given by the Head of the establishment to which he is assigned or by the nominated representative of the Head of that establishment.

10.4 The receiving party shall provide such office accommodation and supporting facilities and services as necessary for the assigned employee to perform the duties.

10.5 As during his period on the premises of the receiving party the assigned employee may need to be present in area subject to radiological control, the providing party as employer of the assigned employee shall furnish to the receiving party before the assignment commences:

- a) a certificate signed by a responsible qualified official that the assigned employees is fit to engage in radiation work, and
- b) particulars of the cumulative dose received by the assigned employee to date during his employment in the nuclear industry.

At the end of the assignment the receiving party shall furnish the providing party with particulars of the radiation dose received by the assigned employee during the course of his attachment.

ARTICLE 11 – DURATION – TERMINATION

- 11.1 This agreement shall come into force upon signature by both parties and shall remain valid for five (5) years.
- 11.2 Within six (6) months before the date of expiration, the parties shall consult each other in order to envisage the possible extension of this agreement.
- 11.3 This agreement may be extended for a period of (1) year by a written amendment agreed upon by the parties.
- 11.4 Any service not achieved by the date of expiration may continue until its completion pursuant to the provisions of this agreement.
- 11.5 Termination of this agreement shall be without prejudice to the rights which may have accrued under this agreement to either party up to the date of termination.

ARTICLE 12 – DISPUTES

- 12.1. In the event of any dispute or difference of opinion between the parties arising out of or in connection with the agreement, each party shall use its best effort to settle such a dispute or difference of opinion amicably by negotiation.
- 12.2 All disputes which cannot be settled amicably between the parties shall finally be settled under the Rules of Conciliation and Arbitration of the International Chamber of Commerce by one or three arbitrator(s) appointed in accordance with the said Rules. The seat of the

Arbitration Tribunal shall be Paris if CEA is the defender, or Kyoto if Kyoto University is the defender.

ARTICLE 13 - APPLICABLE LAW

Except as otherwise set forth hereunder, the validity, construction and performance of the agreement shall be governed by and interpreted in accordance with the laws of the countries of both parties.

This agreement is drawn up and executed in three versions of equal status, in French, in Japanese and in English, the English version having been used for the negotiation.

Date:

For the Division of Nuclear Energy,
Commissariat à l'Energie Atomique:
Director

Date:

For the Research Reactor Institute,
Kyoto University:
Director

Philiipe PRADEL

Seiji SHIROYA

ANNEX 1

JOINT PROGRAM

The research topics are merged into the following three Topics. All the technical tasks will be performed on the basis of a balanced contribution between CEA and KURRI.

TOPIC 1: CELL AND CORE CALCULATION METHODOLOGY AND NUCLEAR DATA LIBRARIES

This Topic includes the following research fields:

- Development and validation of cell and core calculation methodology
 - Treatment of resonance reactions including interference effects
 - Calculation of reactivity coefficients including Doppler coefficients in consideration of time- and space-dependent characteristics
- Development and validation of cell and core calculation codes
 - Sophisticated deterministic and probabilistic codes
- Assessment of evaluated nuclear data libraries
 - Examination on JEF, JENDL and ENDF series data libraries

TOPIC 2: FUEL DEPLETION AND TRU STUDIES

This Topic includes the following research fields:

- Burnup analysis of nuclear fuel, including PIE analysis
 - Assessment of fuel depletion codes including examination on evaluated nuclear data libraries
- Transmutation studies of TRU and MAs
 - Examination on the effect of difference in evaluated nuclear data libraries

TOPIC 3: INFORMATION EXCHANGE ON EXPERIMENTAL TECHNIQUES

This Topic includes the following research fields:

- Information exchange on the development of experimental techniques to measure reactor physics parameters
 - Techniques to measure reactivity including subcriticality, reactivity coefficients including Doppler effect, neutron flux and power distribution, spectral indices including reaction rate ratios, kinetic parameters, and *etc.*
- Information exchange on the progress of current experimental programs

Post BASALA program, ADS programs and programs related with the development of next generation reactors

The detailed items for the cooperative studies should be discussed and determined through the JUA/CEA joint seminar held annually in Japan and France alternately.

9. 本 研 究 に 関 連 す る 発 表 論 文

本研究に関連する研究発表論文として以下のものがある。

学会誌等：

- 1) C. H. Pyeon, T. Misawa, H. Unesaki and S. Shiroya, “Experiments and Analyses for Relationship between Flux Tilt in Two-Energy-Group Model and First-Mode Eigenvalue Separation”, J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 40[2], pp. 171-176, 2004.

口頭発表：

- 1) C. H. Pyeon, Y. Hirano, T. Misawa, H. Unesaki and S. Shiroya, “Preliminary Study on ADSR by Using FFAG Accelerator in KUCA”, Proc. GLOBAL 2003, Atoms for Prosperity: Updating Eisenhower’s Global Vision for Nuclear Energy, pp.2193-2200, New Orleans, Louisiana, U.S.A., Nov. 18, 2003.
- 2) Tsuyoshi Misawa, Hironobu Unesaki, Cheol Ho Pyeon, Chihiro Ichihara, Yasunori Kitamura and Seiji Shiroya, “Research on Accelerator Driven Subcritical Reactor at Kyoto University Critical Assembly (KUCA) with the FFAG Proton Accelerator”, Proc. PHYSOR-2004, The Physics of Fuel Cycles and Advanced Nuclear Systems: Global Developments, Session 2B, Chicago, Illinois, U.S.A., April 27, 2004.
- 3) Hironobu Unesaki, Tsuyoshi Misawa, Chihiro Ichihara, Keiji Kobayashi, Hiroshi Nakamura, Seiji Shiroya, and Kazuhiko Kudo, “Criticality Analysis of Highly Enriched Uranium / Thorium Fueled Thermal Spectrum Cores of Kyoto University Critical Assembly”, Proc. PHYSOR-2004, The Physics of Fuel Cycles and Advanced Nuclear Systems: Global Developments, Session 5C, Chicago, Illinois, U.S.A., April 28, 2004.
- 4) Tsuyoshi Misawa, Hironobu Unesaki, Cheol Ho Pyeon, Chihiro Ichihara, and Seiji Shiroya, “Research on Accelerator Driven Subcritical System at Kyoto University Critical Assembly (KUCA)with the FFAG Proton Accelerator”, Fourth International Workshop on Utilisation and Reliability of High Power Proton Accelerators, Technical Session III, KAERI, Daejeon, Republic of Korea, May 18, 2004.
- 5) 三澤 毅, “京都大学原子炉実験所における FFAG 陽子加速器を用いた加速器駆動未臨界炉の基礎実験”, 日本原子力学会中部支部 第 36 回研究発表会, L2, 名古屋大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリ, 2004 年 12 月 7 日.
- 6) 三澤 毅、宇根崎博信、代谷誠治、岡嶋成晃、安藤真樹、福島昌宏, “光ファイバー検出器を用いた高速炉体系の中性子束分布の精密測定”, 第 1 回東京大学原子力シンポジウム, 東京大学山上会館, 2005 年 3 月 15 日.

これらの論文を順次、次頁以降に示す。

1. はじめに

加速器駆動未臨界炉 (Accelerator Driven Subcritical Reactor、以下ADSRと記す) は、加速器を用いて発生させた高エネルギー中性子を未臨界の核燃料体系に打ち込み、核分裂連鎖反応によって入射中性子を増倍するものである。この炉の概念は近年の加速器技術の飛躍的な発展に基づき将来の新しい型の原子炉システムとして広く国際的な関心を集めている。ADSRは、1) TRUなどの長寿命放射性廃棄物を炉心内に装荷しての核変換処理、2) ^{232}Th や ^{238}U などの親物質を炉心内に装荷して ^{233}U 等の核分裂性核種の生産、3) 炉心で発生したエネルギーで発電を行い加速器運転電力を賄いつつ残りを一般売電用電力として利用する新しい核エネルギー発生装置、4) 研究用強力中性子源、等に利用し得るものと期待されているが、ADSRに関する炉物理的、炉工学的、さらに加速器関連技術を含む研究は国際的にも基礎的研究の端緒についたばかりという段階にある。

この ADSR の特徴は以下の通りである。

- a) 未臨界状態として運転するため即発臨界までの反応度に対する余裕が大きく安全性が向上すると考えられる。さらに、加速器の運転を停止させる炉の運転も停止させることができる。
- b) 未臨界状態が確保できることが判れば制御棒は必要無くなる可能性がある。
- c) 炉心の出力調整は加速器の出力 (ビーム電流、ビームエネルギー)、またはパルス幅とパルス周期等を調整することによる行うことができる。
- d) ADSR 内で入射された中性子は体系中での核分裂連鎖反応により増倍されることから、加速器ターゲットに近い位置を除きほぼ中性子スペクトルは未臨界炉固有のものとなる。
- e) 多くの ADSR の設計は液体金属 (主に Pb-Bi) 冷却の高速炉体系を念頭に行われている。

2. 京都大学原子炉実験所での FFAG 加速器の建設

京都大学原子炉実験所 (京大炉) では次期将来計画として研究用中性子源として用いるADSRの実現を目指し基礎研究を行っていた¹⁾。2002 年度には文部科学省提案公募事業「革新的原子力システム技術開発」として「FFAG (Fixed Field Alternating Gradient) 加速器を用いた加速器駆動未臨界炉に関する技術開発」が採択され、2004 年度までに 150MeVの陽子ビームを発生させることができるFFAG加速器を建設し、2005 年度より京都大学臨界集合体実験装置 (KUCA) の固体減速炉心と組み合わせてADSRの基礎研究を行うことが計画されている。

FFAG 加速器は 1953 年に大河博士による原理提案がされた装置で、電子線による加速は実現していたが、広帯域で高電場強度の高周波加速装置の開発が困難であったため陽子加速は実現していな

かった。しかし、近年新しい高周波空洞が開発され、それを用いて 2000 年に KEK にて初めて陽子加速器 (PoP-FFAG、最高エネルギー 2MeV) が造られた。FFAG は固定磁場で強収束型の加速器で、例えばこれまでのシンクロトロン加速器と比べて、①繰り返し周波数を 1kHz 程度まで、duty factor を数十%程度まで高くすることができる、②加速エネルギーが可変である、③空間電荷不安定性の問題が少ない、などの特徴があり ADSR 用の加速器として様々な利点を持っている。2002 年には KEK において 150MeV 陽子 FFAG 加速器が完成し、現在調整運転を行っているが、京大炉の FFAG 加速器は KEK での製作・運転経験を生かして設計されたものである。最大陽子エネルギーは 150MeV、ビーム電流は最大 $1\mu\text{A}$ 、繰り返し周期は 120 Hz で、今年度中に既に建設が完了した加速器棟内に設置し、2005 年度中に加速器棟から KUCA 棟を繋ぐビームラインの工事を行い、KUCA の炉心に隣接して設置するタングステン等の金属ターゲットに陽子ビームを照射して高エネルギー中性子を発生させ炉心内へ入射させる予定である。

3. ADSR 基礎実験の計画

京大炉での公募研究事業に基づく ADSR 研究計画は、ADSR 用の FFAG 陽子加速器の開発と加速器と KUCA の未臨界体系とを組み合わせたシステムの核特性に関する研究とからなっている。FFAG 加速器の開発では、FFAG の設計・製作に加えて実際に陽子エネルギーを可変として運転を行う上での様々な技術的課題を解決していく必要がある。また、核特性に関する研究では FFAG 加速器の利用開始前に、既に KUCA に設置されているコッククロフト・ウォルトン型の加速器 ((D,T) 反応による 14MeV 中性子を発生) と未臨界炉心とを組み合わせた ADSR 基礎実験を行っており、2 種類の加速器の利用を併せて研究を行っていくが、今後の核特性に関する研究課題としては下記のようなことが挙げられる。


- a) ADS の未臨界体系での中性子増倍特性、中性子束分布、中性子エネルギースペクトルの把握
- b) 未臨界体系を確実に維持するための監視方法の開発
- c) 未臨界状態での反応度変化、入射ビームの強度やスペクトル変化時の挙動
- d) ADS 設計のための統一的な核計算コードの開発

なお、これらの公募研究事業に沿った ADSR 研究とは別に、ADSR の冷却材として考えられている液体 Pb-Bi のループを設置し Pb-Bi の熱流動特性に関する研究を開始している。

今後これらの加速器技術、核特性、炉工学分野に関する研究を総合的に行い、ADSR 開発のための基礎研究を推進していく予定である。

参考文献

- 1) 代谷誠治, “トリウムサイクルと加速器駆動未臨界炉の炉設計のために必要な研究”, 原子核研究, 43[1] (1998) 27.



京都大学原子炉実験所における FFAG陽子加速器を用いた 加速器駆動器駆動未臨界炉の基礎実験

京都大学原子炉実験所
原子力基礎工学研究部門

三澤 毅

原子力学会 中部支部 研究発表会
2004.12.7

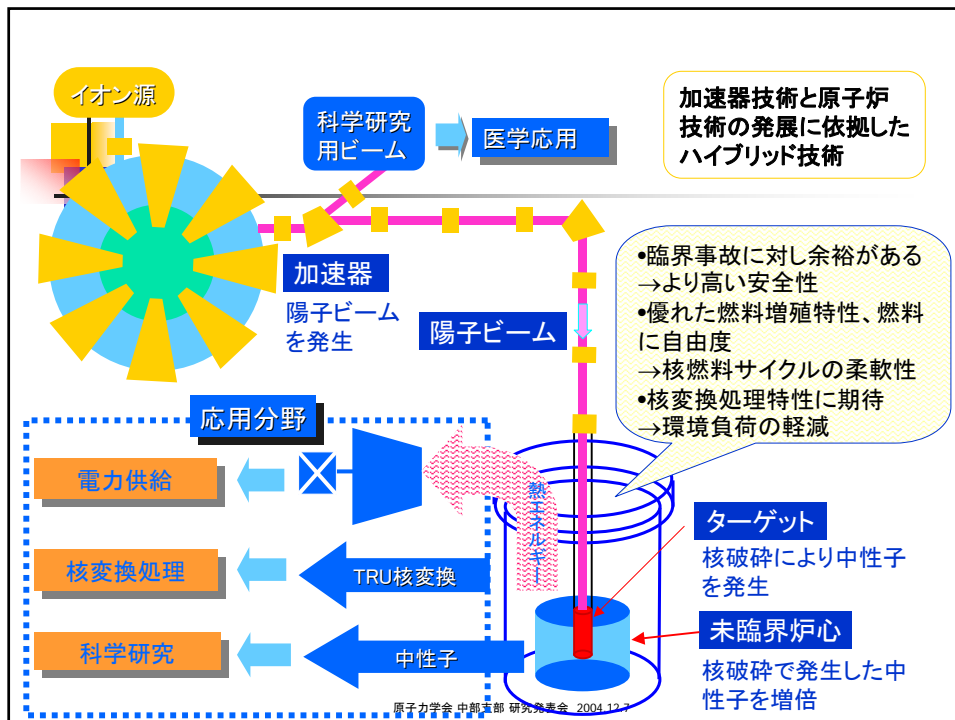
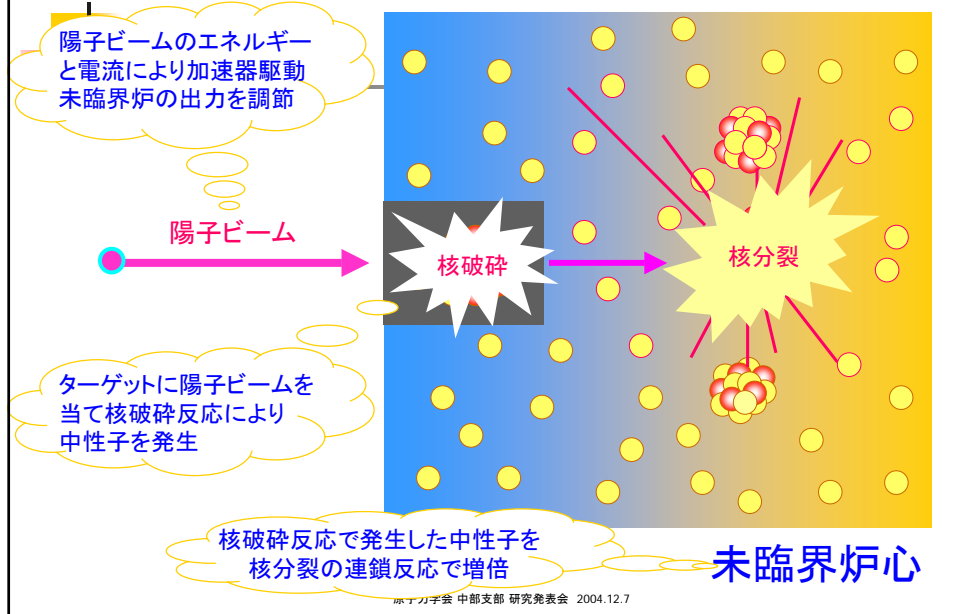


加速器駆動未臨界炉(ADSR)

- Accelerator Driven System (ADS)
 - Accelerator Driven Subcritical System
 - Accelerator Driven Subcritical Reactor (ADSR)
- 加速器と未臨界炉とを組み合わせ稼働させるシステム
- 陽子加速器とタングステンなどの重金属ターゲットを用いて中性子を発生
- 1993年にC.Rubbia博士(CERN)がエネルギー発生システムとして提唱

原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7

加速器駆動未臨界炉の原理





ADSRの目的

- エネルギー発生システム
 - 未臨界炉からの熱エネルギーを電気エネルギーに変換して利用
- 親物質からの核燃料の生産
 - Th-Uサイクル
- 核変換システム
 - TRU、MAの核変換処理
 - 高レベル放射性廃棄物の処分
- 中性子源
 - 研究用原子炉と同様の役割（京大炉での研究）

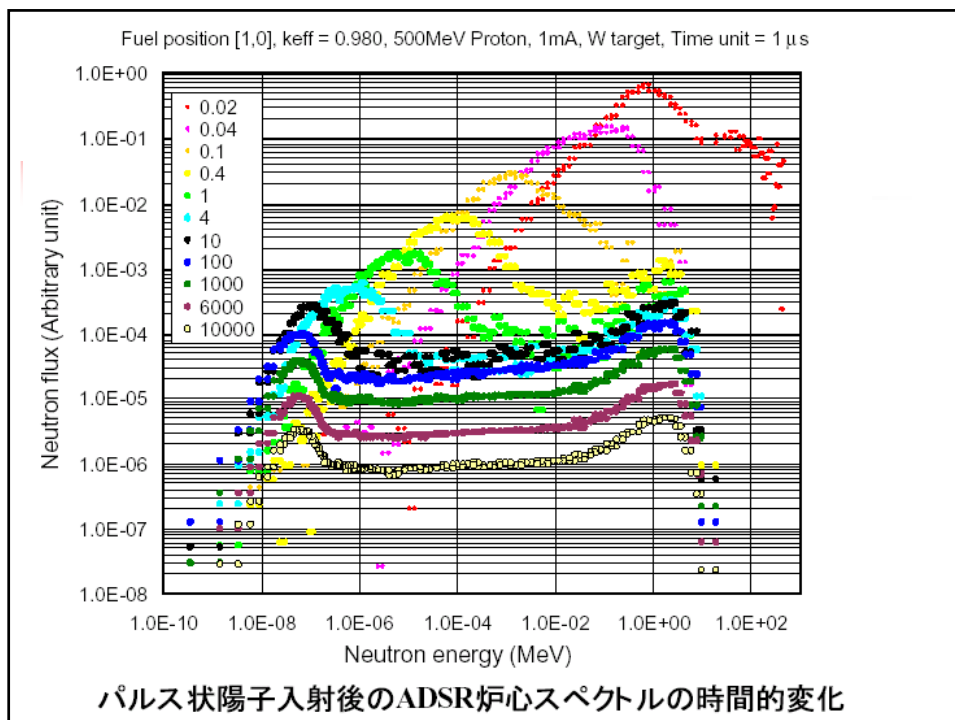
原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7



ADSRの特徴(1)

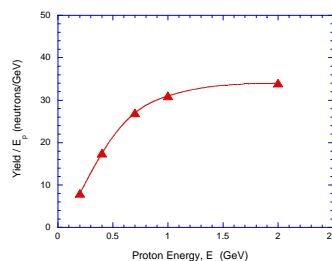
- 未臨界体系であるため加速器停止で炉も停止する
 - 発熱のある場合に停止後の冷却は必要
- 即発臨界までの反応度の余裕が大きく、反応度事故を起こす可能性が少ない
- 炉心内で高エネルギー中性子が発生するターゲット周辺とそれ以外の場所での中性子束、および中性子エネルギースペクトルが大きく変化する

原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7



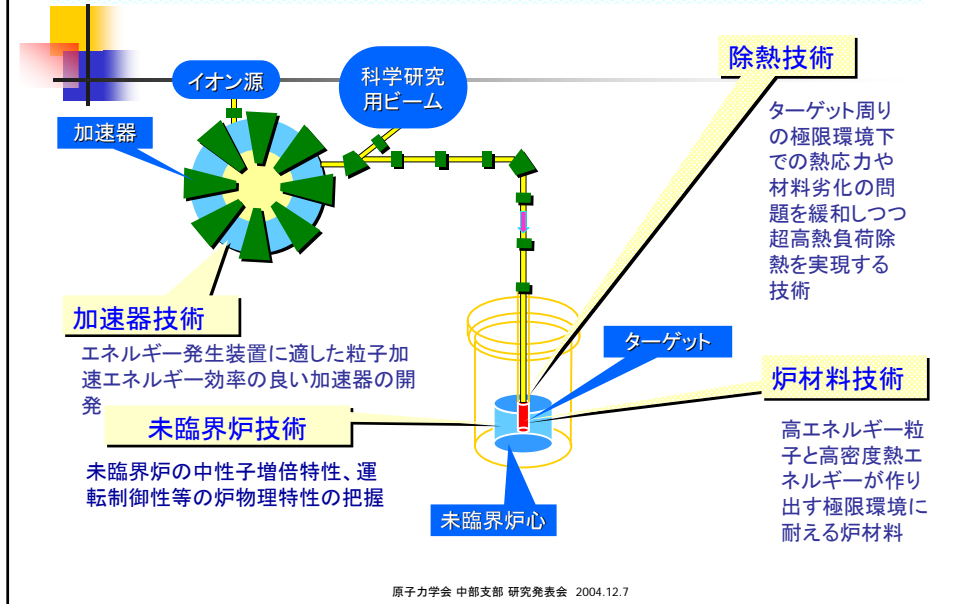
ADSRの特徴(2)

- 出力 $\propto \frac{S}{1 - k_{eff}}$
 - 出力の調整方法は中性子発生量、k-eff
- 中性子発生量は入射粒子のエネルギーに依存する(核破砕反応による中性子)
 - 出力の調整
 - ビーム電流
 - ビームエネルギー
 - パルスビームの場合
 - パルス幅
 - パルス周期



原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7

ADSRの研究課題



炉物理分野での研究課題(1)

- 未臨界体系での炉物理 (k_{eff} : 0.95~0.98)
 - 中性子増倍特性
 - 中性子束分布
 - 中性子エネルギースペクトル
- 未臨界状態での反応度変化、入射ビームの強度やスペクトル変化時の挙動
 - 加速器ビーム強度、ビームエネルギーの変化
 - ビーム立ち上げ時
 - ビーム切断時

原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7



炉物理分野での研究課題(2)

- 未臨界を確実に維持するための監視方法
(未臨界度モニター)
 - パルス中性子法
 - 中性子源増倍法
 - 炉雑音法(周波数領域解析法)
 - 炉雑音法(分散対平均比法)
 - 指数実験法

原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7



炉物理分野での研究課題(3)

- ターゲットに関する研究
 - 陽子+ターゲットから発生する中性子絶対数
 - 発生する中性子、 γ 線のエネルギースペクトル
 - 測定技術も含めて
 - ビームエネルギーを変化
 - ターゲット材質を変化(W、Pb、Li、Be等)
 - 時間経過

原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7



炉物理分野での研究課題(4)

- ADSR設計のための核計算コードの開発
 - 核破砕反応の取り入れ
 - 高エネルギー中性子の取り扱い
 - 未臨界体系
 - 複雑な形状
 - 時間依存

原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7



各国のADSR実験計画

- TRADE計画
 - CEA(仏)、Karlsruhe(独)、ENEA(伊)が共同でENEAにADS実験装置を建設
 - TRIGA+加速器(2005年建設開始)
- JINR(露)での計画
 - 既設加速器にADS実験装置を建設(2006年)
- J-PARC計画(原研)
 - 核変換実験施設を建設(時期は未定)
- MUSE実験
 - CEA(仏)で未臨界炉と14MeV中性子

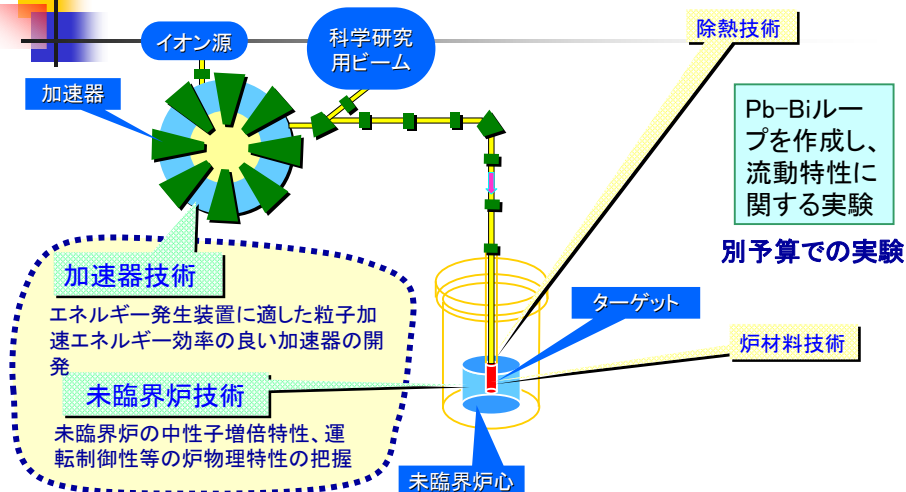
原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7

京大炉でのADSR実験計画

- 文科省提案公募事業「革新的原子力システム技術開発」の「FFAG加速器を用いた加速器駆動未臨界炉に関する技術開発」(5年計画)
 - 2002年～2004年
 - 150MeVのFFAG(Fixed Field Alternating Gradient)陽子加速器の開発、製作、設置
 - 既設加速器を利用したADS実験
 - 2005年
 - FFAG調整、KUCAとの結合
 - 2006年
 - KUCA+FFAGによるADSR実験

原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7

目的:革新的エネルギー発生装置としてのADSRの成立性評価



「革新的原子力システム技術開発」(2002～2006年度)範囲

原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7

京大提案のADSRの特徴

$$\text{ADSRの出力} \propto \frac{S}{1 - k_{eff}}$$

燃料の燃焼により k_{eff} が変化
・制御棒等による k_{eff} の調節
・ S の調節

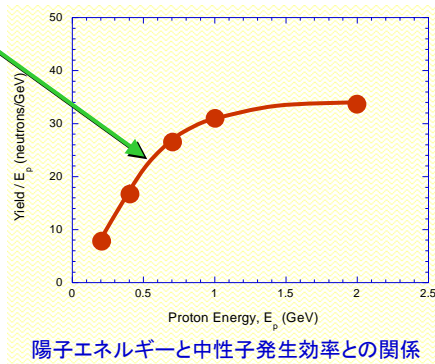
S の調節
・加速器ビーム電流による制御
・加速粒子エネルギーによる制御

電流調整範囲が広がれば
加速器の安定性に問題

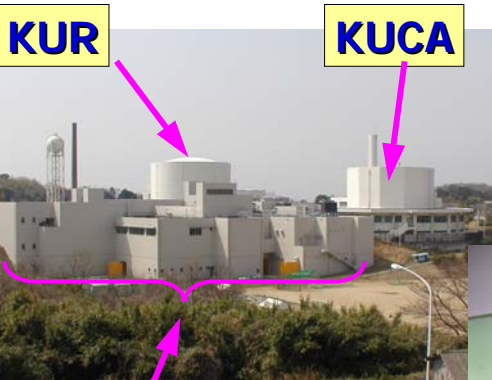
エネルギー可変型FFAG加速器
・ビーム電流と粒子エネルギーによる制御が可能

本計画では

- ◆未臨界炉は熱中性子体系
- ◆加速器の目標
 - ・エネルギー範囲: 2.5~150MeV
 - ・電流値: ~1 μ A



原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7



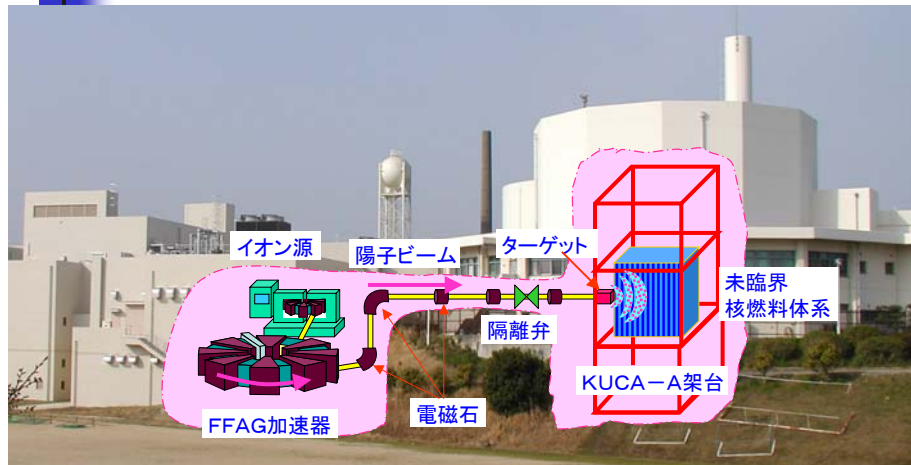
イノベーションリサーチラボ



FFAG加速器フロア

原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7

KUCAとFFAGシンクロトロンとを結合させた 加速器駆動未臨界炉に関する基礎実験概念図

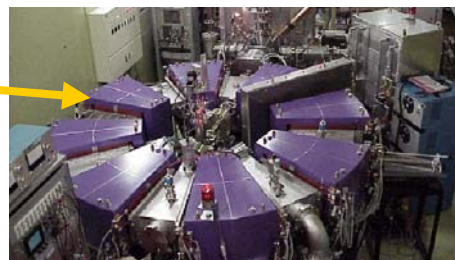
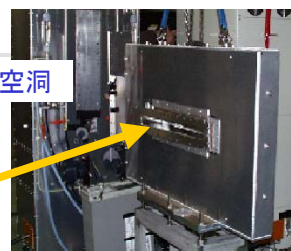


原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7

FFAG加速器の研究開発状況

- 1953: 大河千弘博士による原理提案
最近まで陽子加速FFAGは実現せず
→ 広帯域 & 高電場強度の高周波加速装置の困難
- 1998: MA (Magnetic Alloy) 高周波空洞の開発
「科研費(基盤A): 代表者: 森義治」
- 2000: 陽子加速FFAG開発
→ 世界で初めて (2MeV)
「科研費(基盤A): 代表者: 森義治」
- 2002: 150MeV汎用型FFAG加速器の開発開始
「学術創生」医学応用を主な目的

高周波加速空洞

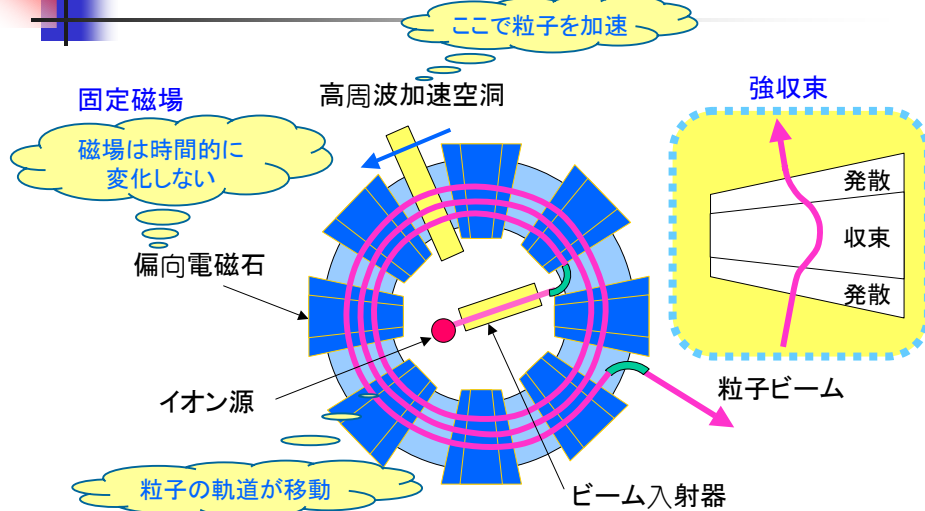


原理実証陽子加速FFAG加速器 (PoP-FFAG)

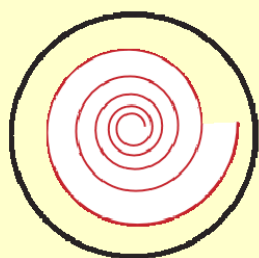
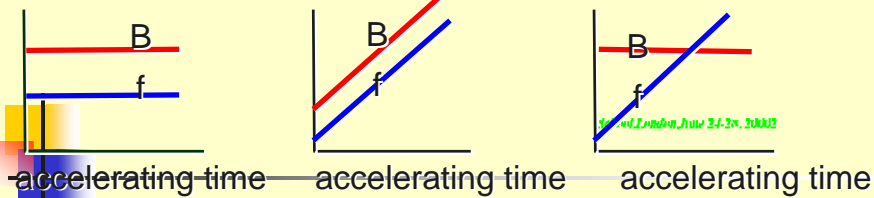
原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7

FFAG加速器

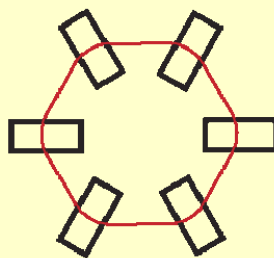
FFAG (Fixed Field Alternating Gradient) : 固定磁場・強収束型



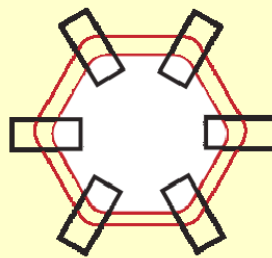
原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7



Cyclotron
*isochronous



Synchrotron
*const. closed orbit
(varying mag. field)



FFAG
*varying closed orbit
(const. mag. field)

通常のシンクロトロンとFFAG加速器との比較




	FFAG	シンクロトロン
1. 磁場	固定	時間変化
2. 軌道半径	移動	固定
3. 集束	強集束	強集束
4. デューティファクタ (繰返し)	大～10-50% (最高～1kHz)	小～1% (～50Hz)
5. 空間電荷不安定	クリティカルではない	厳しい

FFAG開発の問題点

- * 複雑な磁場 → 3Dコード(TOSCA等)
- * 高周波系: 高加速電界+高速変調
→ 高勾配・高帯域高周波空洞の開発

原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7

FFAGの利点

- 
- 速い加速
 - DC電磁石を使用しているためRFのパターンだけで加速可能。電磁石とRFの同期不要。
 - 高い平均電流
 - 高いくり返しにより一度に 加速する粒子数を少なくできる。
 - 空間電荷効果と不安定性は閾値以下となる。
 - エネルギー変更が可能
 - 可変k値
 - 低電力
 - DC電磁石であるため、超伝導化が容易

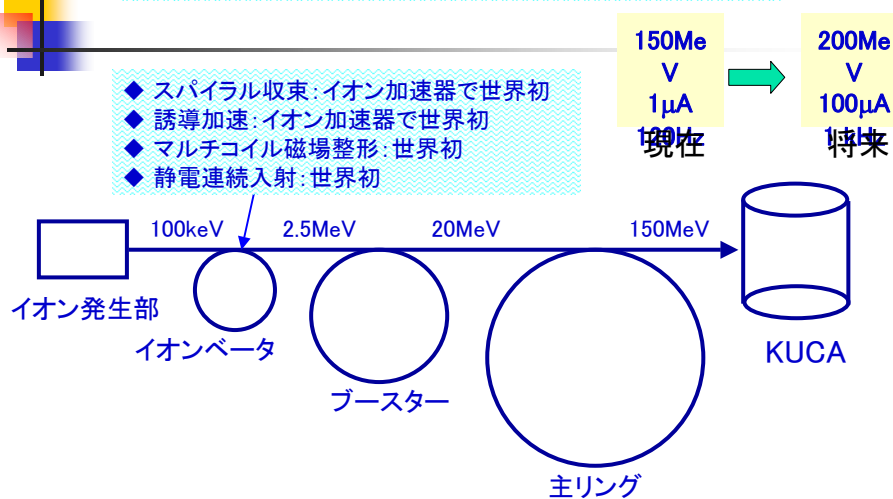
原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7

150MeV陽子加速FFAG用電磁石



原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7

FFAG加速器システム構成



原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7

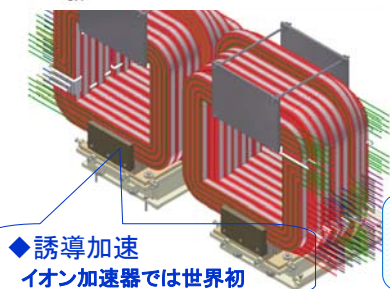
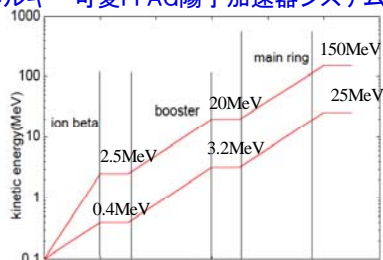
FFAG加速器システムパラメータ

	イオンベータ	ブースター	主リング
集束方式	スパイラル	径方向 DFD	径方向 DFD
加速方式	ベータトロン	高周波	高周波
セル数	8	8	12
k値	2.5	4.5	7.6
入射エネルギー	100keV	2.5MeV	20MeV
取出しエネルギー	2.5MeV	20MeV	150MeV
P_{ext}/P_{inj}	5.00	2.84	2.83
入射軌道半径	0.60m	1.42m	4.54m
取出し軌道半径	0.99m	1.71m	5.12m

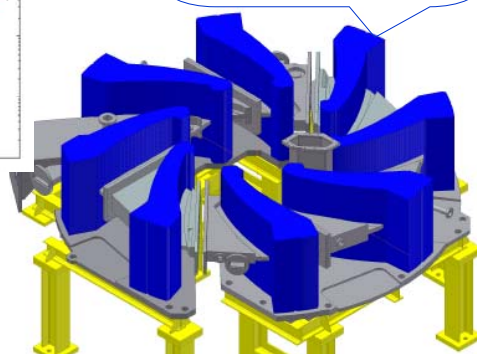
原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7

イオンベータによるエネルギー可変システムの実現

イオンベータのk値を可変とすることにより世界初のエネルギー可変FFAG陽子加速器システムを実現



◆誘導加速
イオン加速器では世界初

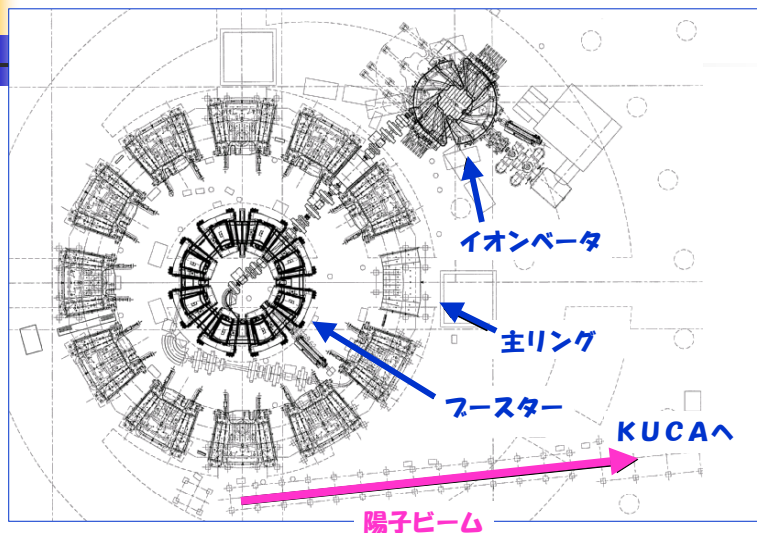


◆ブースター・主リングは電磁石全体の磁場を上げ下げすることによりエネルギーを可変にする。

◆スパイラル収束方式
イオン加速器では世界初
◆マルチコイル磁場整形
世界初

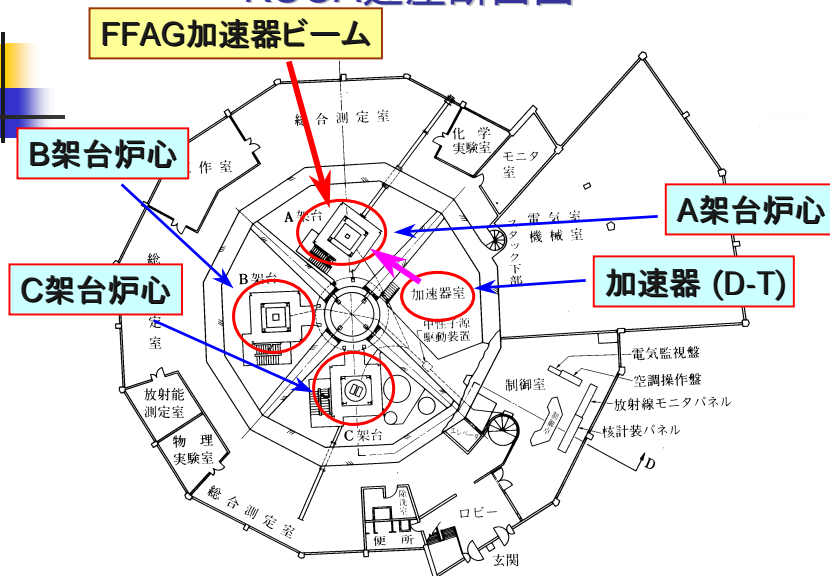
原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7

FFAG加速器のレイアウト



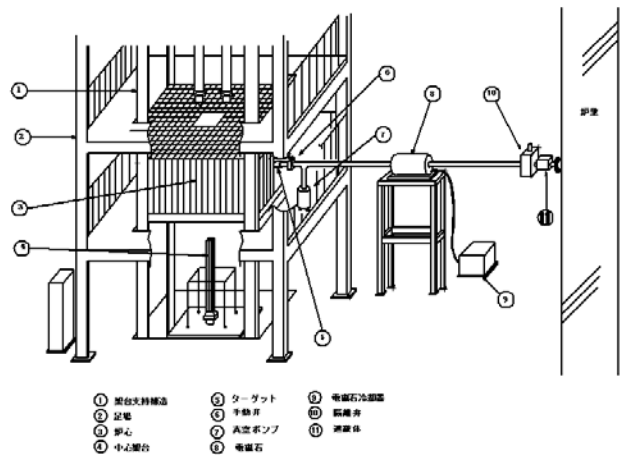
原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7

KUCA建屋断面図



原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7

KUCA炉心とビームライン配置図



KUCA-A架台と付設加速器を用いたADS基礎実験

- KUCA付設のコッククロフト・ウォルトン型加速器
 - 最大加速電圧: 350keV
 - (D,T) 反応による14MeV中性子発生
 - パルス中性子法による深い未臨界度測定
 - Th体系のスペクトル測定
- A架台と組み合わせてADSの基礎実験に利用

炉心(A架台)と加速器を組み合わせた実験



(D,T)反応、14MeV中性子



コッククロフト型加速器

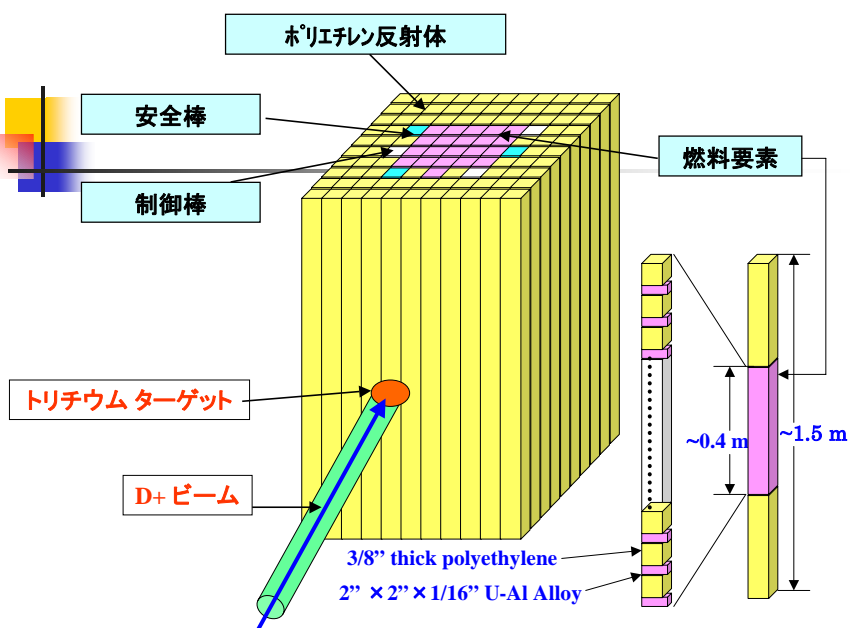
Max: 350keV、6mA

ピーク値: 8×10^{10} n/s



加速器ターゲット

原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7



KUCAのA架台と加速器とを組み合わせた実験

原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7



KUCAを用いたADS基礎実験

- 解析手法
- 中性子ビームダクトの検討
- 中性子束分布測定
- 中性子エネルギースペクトル測定
- 未臨界度測定
 - パルス中性子法
 - 炉雑音解析法(平均対分散法)
 - 中性子源増倍法

原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7



実験解析

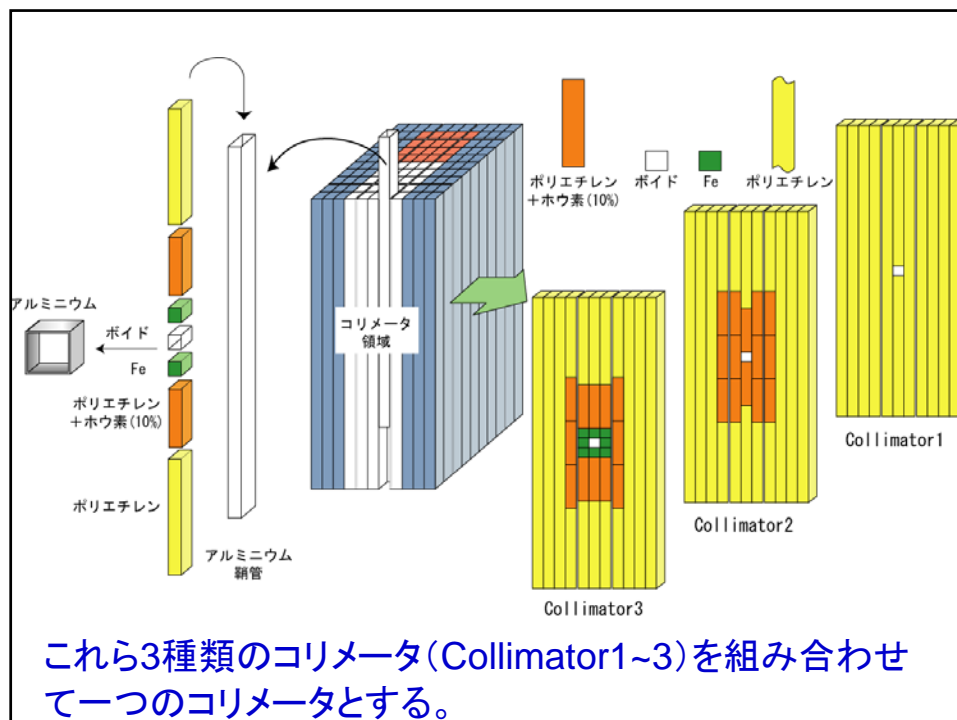
- 連続エネルギー・モンテカルロ法
 - MCNP、MVP(20MeVまでのエネルギー)
 - MCNPX(20MeV以上のエネルギーを含む)
- 決定論的手法
 - 輸送計算(Sn法)
 - 拡散計算

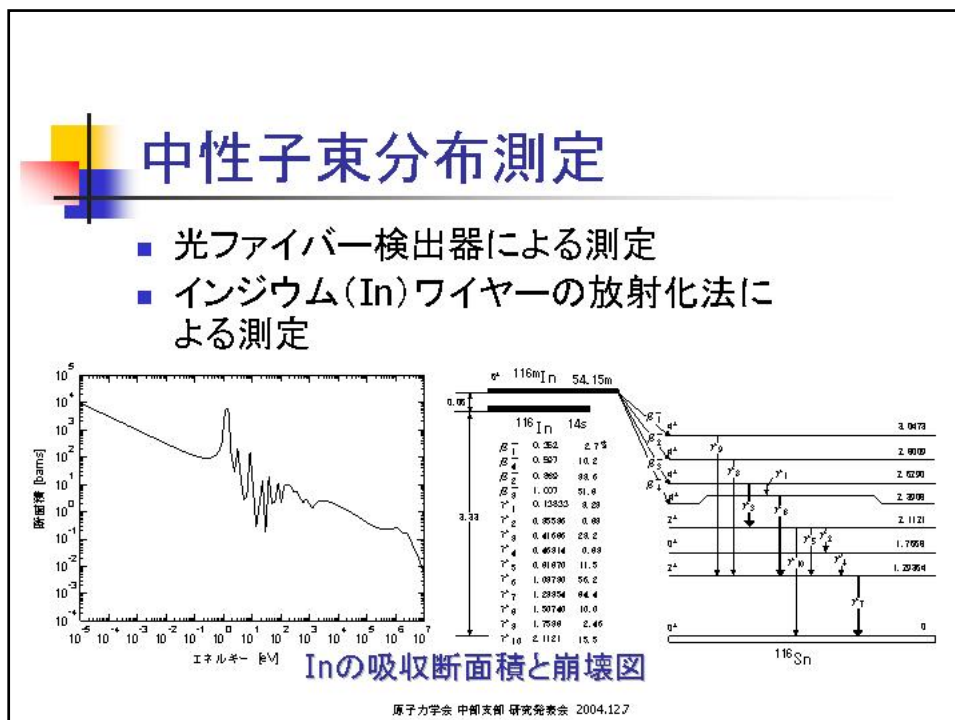
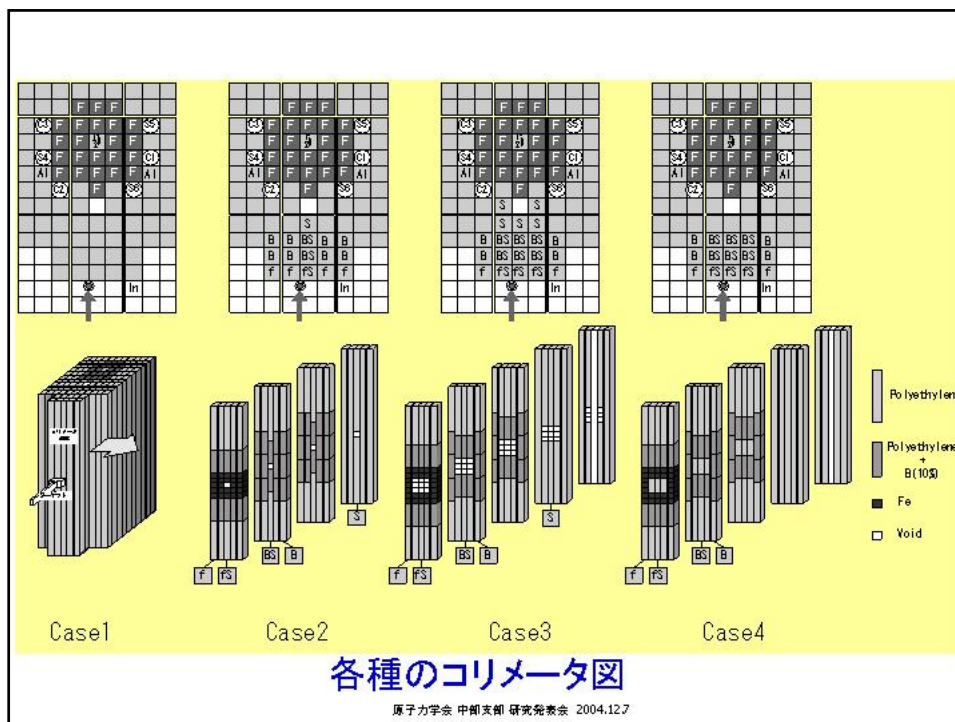
原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7

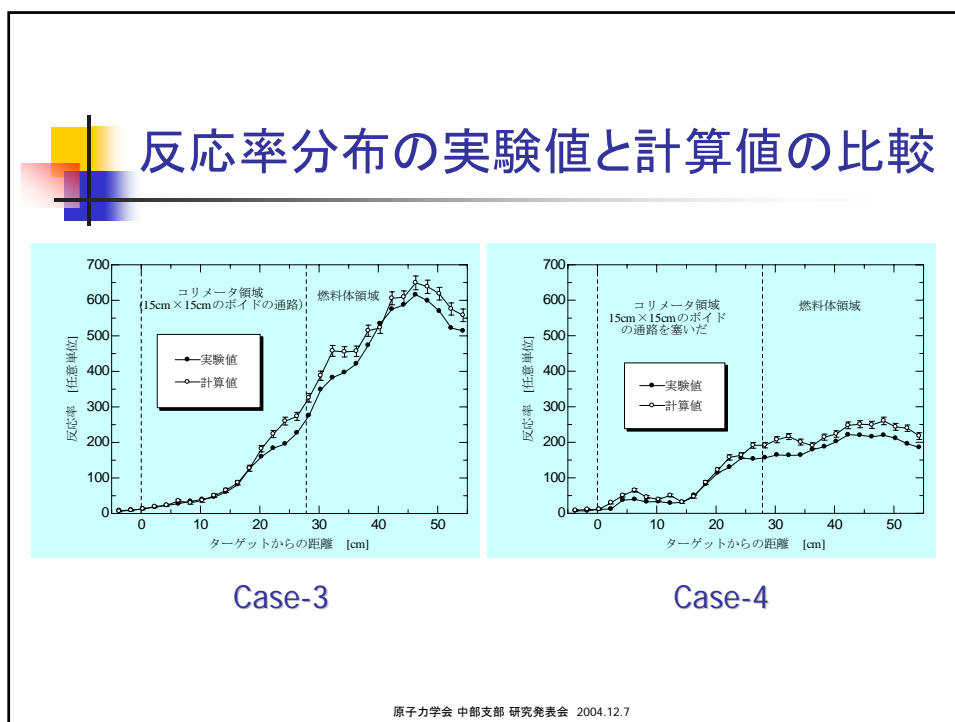
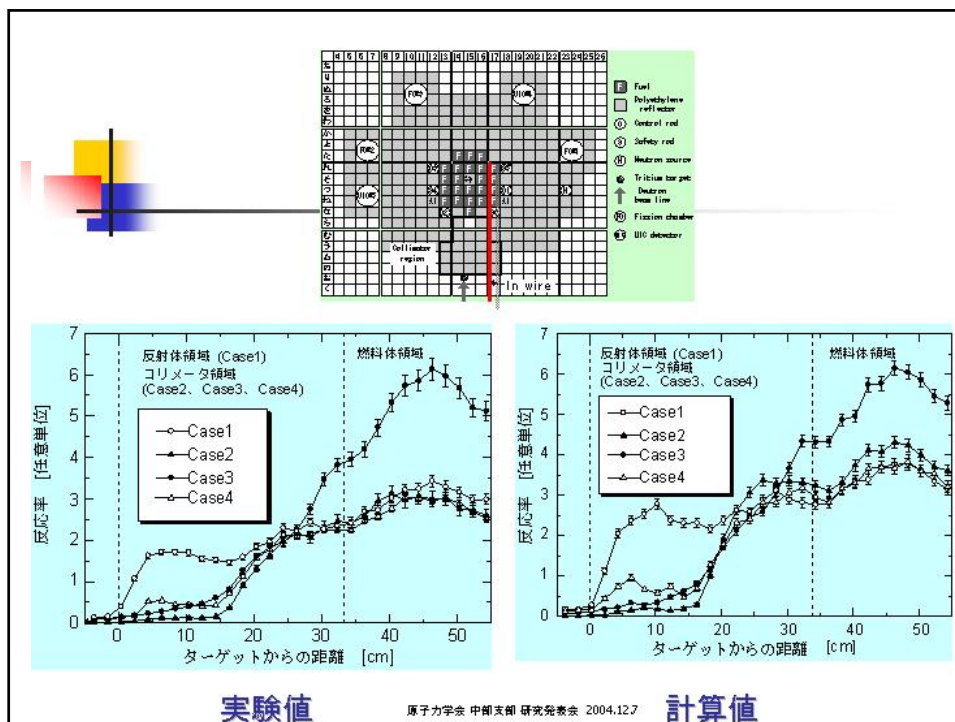
中性子コリメータの設計

- 加速器ターゲットから炉心まで中性子を送るための中性子コリメータを設計
 - ポリエチレン、ホウ素入りポリエチレン、鉄ブロック、ビームダクトを組み合わせる
 - ターゲットで発生した高エネルギーの中性子のみ炉心に入射させるように設計する

原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7







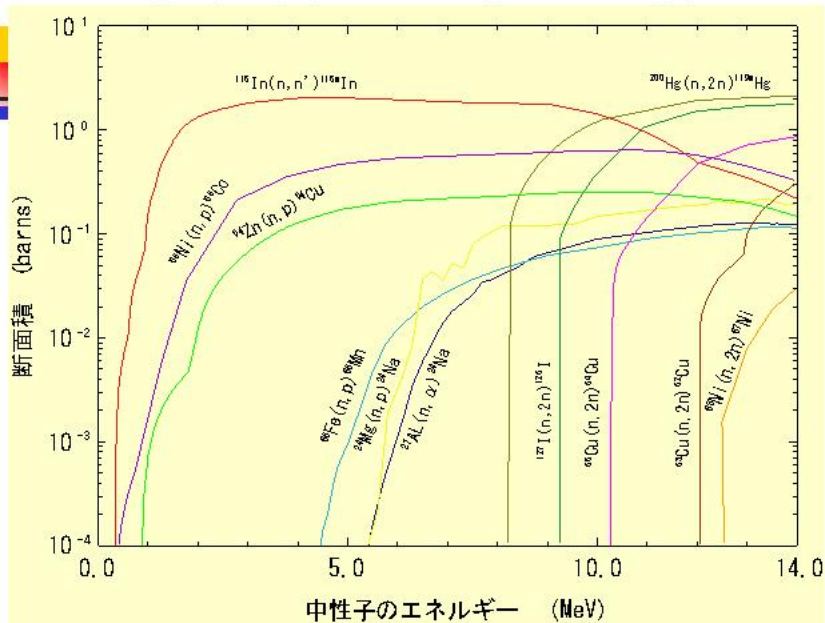


中性子スペクトル測定

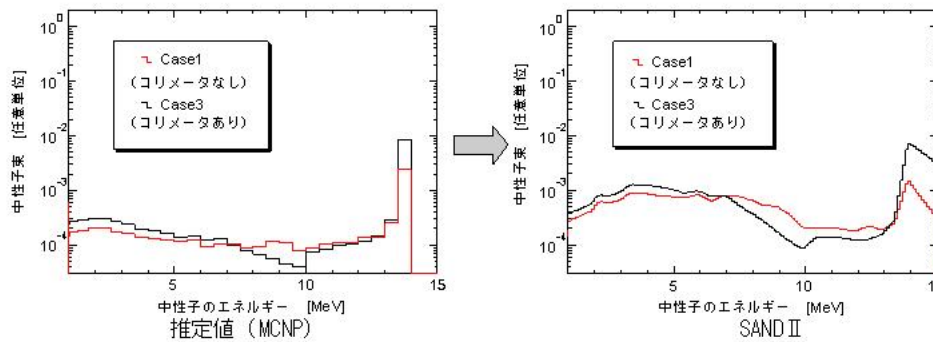
- ターゲットから発生する中性子、および炉心内のスペクトルを測定
- NE213液体シンチレータ
 - γ 線と中性子とのパルスの立ち上がり時間の差を利用して中性子成分のみ検出する
- 放射化箔(閾値反応)

原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7

放射化法で用いた箔の断面積



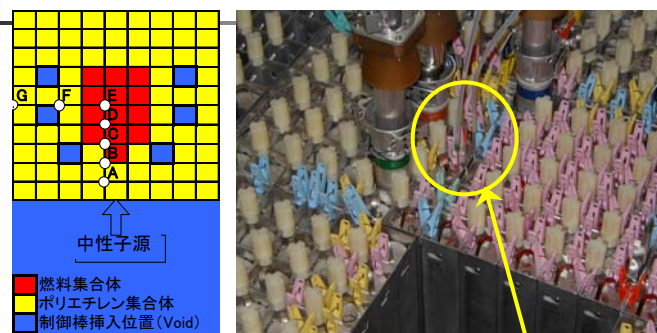
放射化箔の測定結果に基づくアンフォールディングによる中性子スペクトルの評価



問題点: 放射化量が少ないため誤差が大きい

原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7

パルス中性子法による未臨界度測定



複数の光ファイバー
検出器を炉内に設置

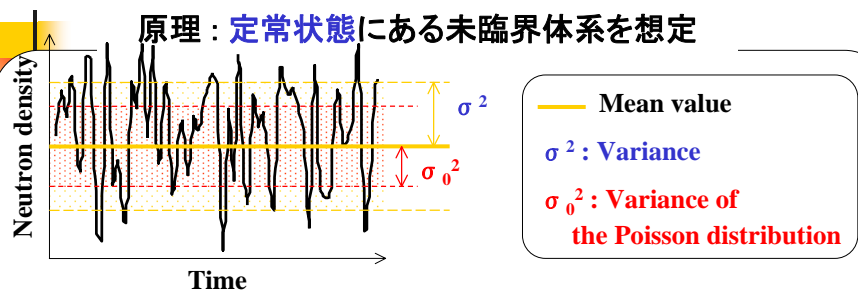
原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7

実験値と計算値の比較

燃料体数	実験値 (\$)	計算値 (\$)	C/E
19体	2.32±0.02	2.79±0.04	1.20
17体	6.40±0.08	5.71±0.03	0.89
15体	10.9±0.2	10.35±0.04	0.94
13体	13.4±0.2	15.73±0.04	1.17
9体	28.2±1.1	29.52±0.04	1.05
6体	49.4±1.0	52.89±0.05	1.07

原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7

パルス中性子による炉雑音実験(平均対分散法)



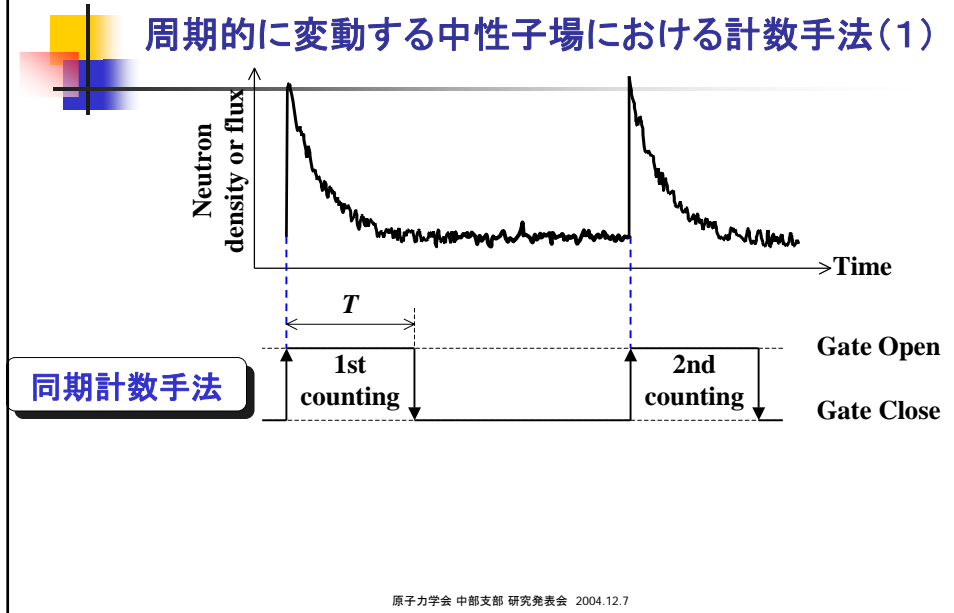
Y値の定義

$$Y(T) \equiv \frac{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N Z_k(T)^2 - \left\{ \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N Z_k(T) \right\}^2}{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N Z_k(T)} - 1$$

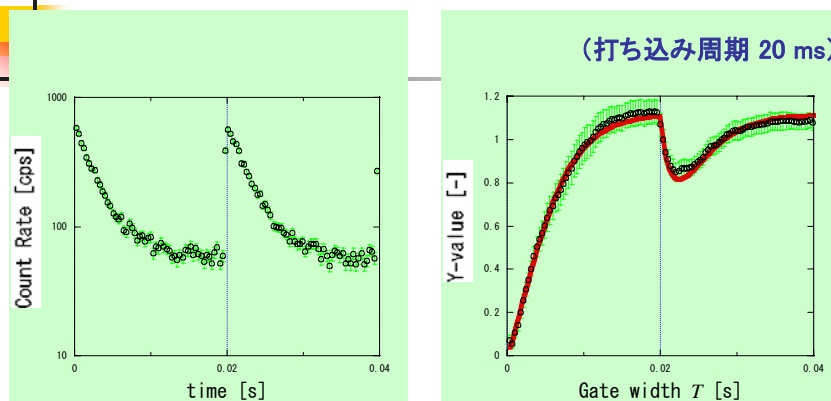
Y値のゲート幅T
 に対する依存性
 から 即発中性子
減衰定数 α を得
 る

原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7

周期的に変動する中性子場における計数手法(1)



パルス中性子による炉雑音実験(平均対分散法)



Pulsed neutron method (Area-ratio method)		V-to-variable-M method	Comparison of α -value
$-\rho$ [β]	α_0 [1/s]	α [1/s]	$(\alpha - \alpha_0) / \alpha_0$
1.597 ± 0.012	357.8 ± 0.9	359 ± 16	0.005 ± 0.045

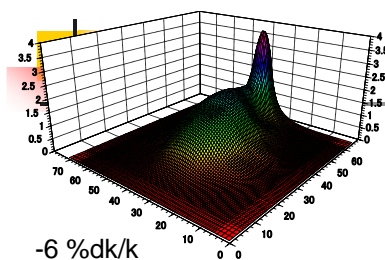
高次モード中性源増倍法による 未臨界度測定

- 外部中性子源と検出器のみで測定可能
- 解析が簡単
- 機器の信頼性が高い
- 反応度の校正点が必要 (ϵS を求めるため)
- 未臨界度が深くなると精度が悪くなり、検出器位置依存性が高い



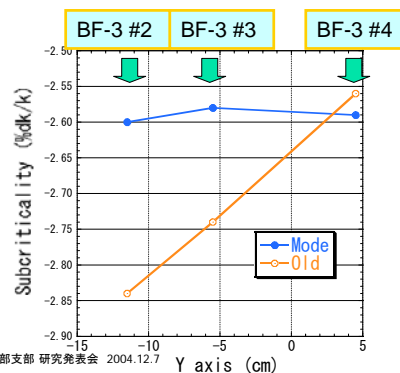
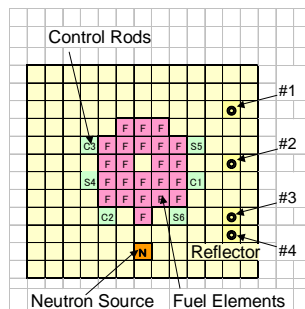
高次モード取り入れた
中性子源増倍法

原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7



$$\phi' = \sum_{i=0}^N C_i \phi_i$$

中性子束を高次モードで展開する



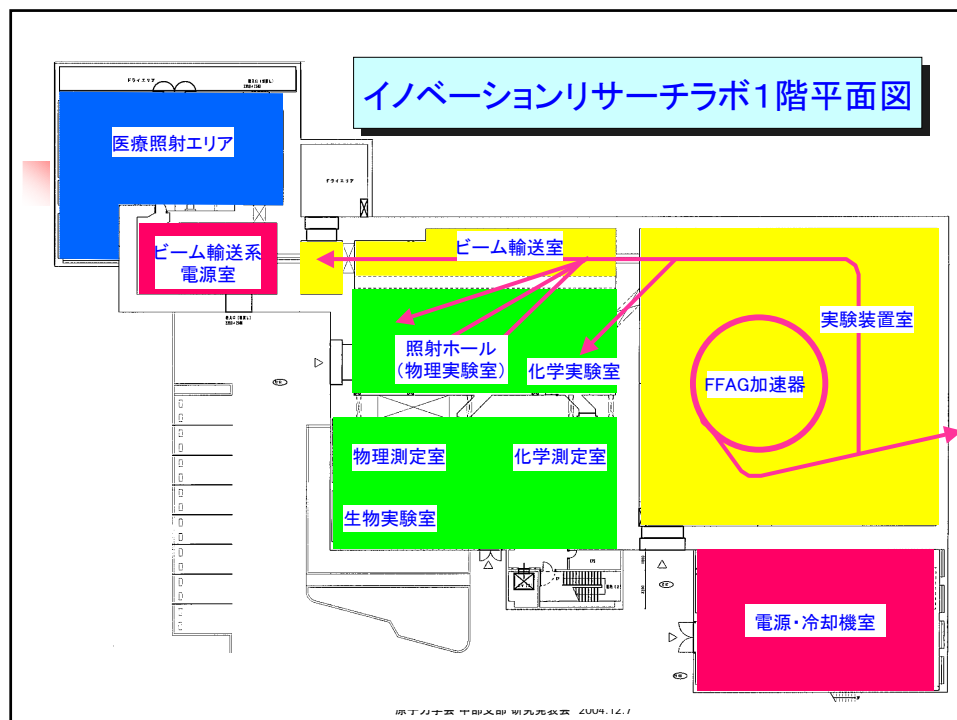
原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7

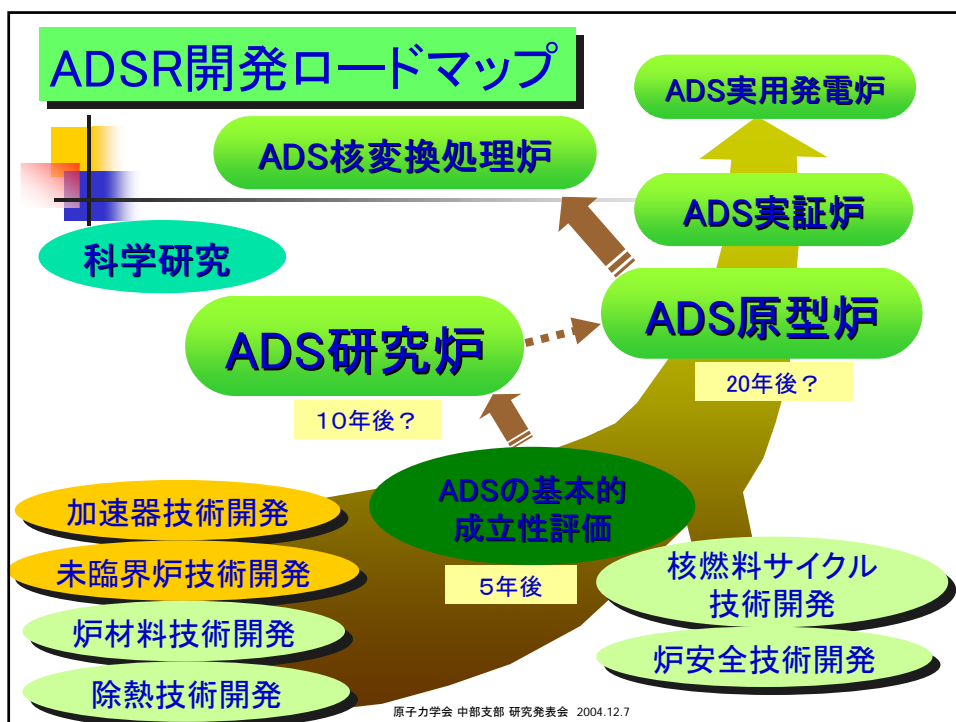
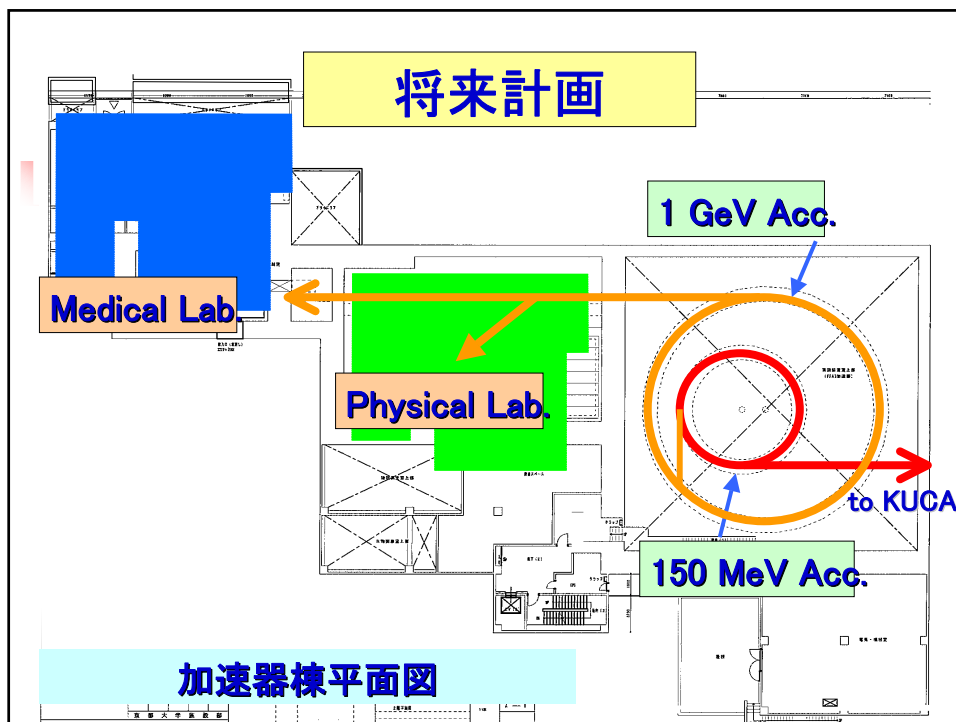


今後の課題

- 加速器開発
 - ビームを出すまで苦労が続く...
 - エネルギー可変が実現できるか？
 - 時期計画への発展が可能か？
- 炉物理
 - 未臨界度評価手法の検討
 - ADS動特性実験の不足
 - 計算の信頼性評価
 - スペクトル測定法の確立

原子力学会 中部支部 研究発表会 2004.12.7





光ファイバー検出器を用いた高速炉体系の中性子束分布の精密測定

京大炉¹

○三澤 毅¹、宇根崎博信¹、代谷誠治¹、

原研²

岡嶋成晃²、安藤真樹²、福島昌宏²

日本原子力研究所の高速炉臨界集合体（FCA）の低減速炉模擬炉心において、LiF+ZnSを用いた光ファイバー一中性子検出器、および種々の核分裂計数管を用いて反応率分布を測定し計算値との比較を行った。

キーワード： FCA, 光ファイバー検出器、核分裂計数管、反応率分布

1. 緒言 FCAでは様々な炉心において反応率分布の測定が行われ炉心特性の評価に利用されている。またそれらの結果を計算結果と比較することにより、炉心解析手法の妥当性の検討やアクチニド核種等の反応断面積の評価などに用いている。近年、細径の光ファイバーを用いた新しい中性子検出器（光ファイバー検出器）の開発が進み、炉心に大きな外乱を与えることなく短時間で詳細な反応率分布を測定することができるようになってきた。本研究の目的は、FCA炉心の径方向に着目して光ファイバー検出器を用いて反応率分布を測定するとともに、数種類の核分裂計数管を用いて同じ位置での反応率分布を測定し、それらの結果を比較検討することである。

2. 実験 実験は図 1 に示すような低減速炉を模擬したFCA-XXII-1(45V)炉心において行った。光ファイバー検出器（直径約 1.5mm）は先端にLiF+ZnSを塗布したものであり、⁶Liの反応率を測定することができる。光ファイバー検出器は図の径方向（軸方向は炉心の中心部）に設置し、炉心出力をモニターしながら臨界状態にてファイバーを遠隔操作で移動させて反応率分布を測定した。1 回の測定時間は約 2 時間である。また、同じ位置においてEU、NU、Np、Puを用いた各々の核分裂計数管を用いてこれらのアクチニド核種の核分裂反応率分布を測定した。

3. 結果 図 2 に反応率分布の測定値を炉心中央で規格化した結果を示す。各測定値はほぼ同じ形状をしているが、炉心中央から離れたブランケット領域（SB）でやや異なった値となっていることが判る。これはこの領域での中性子エネルギースペクトルが規格化した炉中心（低減速炉心領域）のものと大きく異なっているためと考えられる。現在、SRAC等の計算コードを用いた解析を行っており、この形状の相違についての原因を調べるとともに測定結果の評価を行っている。

本研究は京大炉・名大と原研との協力研究により行われた。

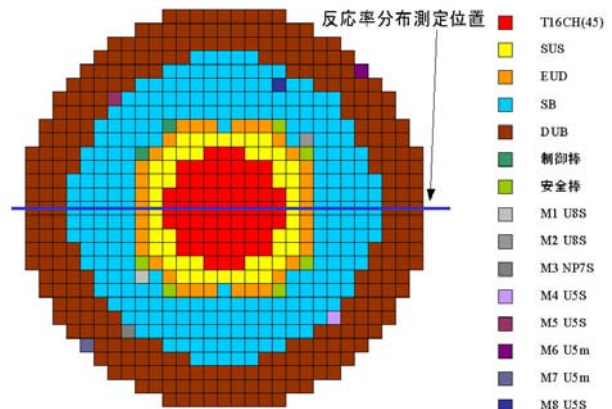


図 1 FCA 炉心断面図

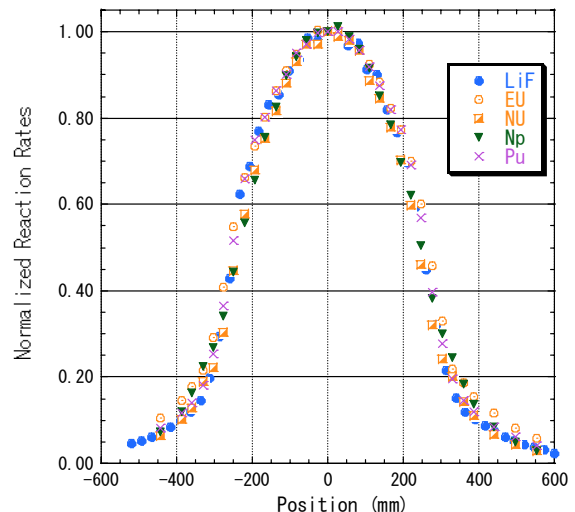


図 2 反応率分布測定結果

光ファイバー検出器を用いた高速炉体系の 中性子束分布の精密測定

三澤 毅¹、宇根崎博信¹、代谷誠治¹、
岡嶋成晃²、安藤真樹²、福島昌宏²

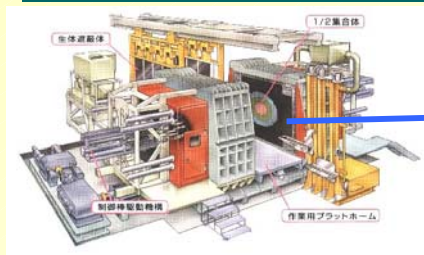
¹京大炉、² 原研

研究の目的:

- 光ファイバー検出器の高速炉体系への適用
- 高速炉の中性子束分布の詳細測定(計算との比較)
- 未臨界体系での中性子束分布測定



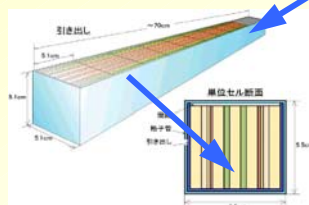
実験炉心：高速炉臨界集合体(FCA)



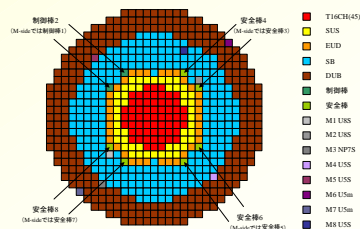
Fast Critical Assembly



炉心分割面

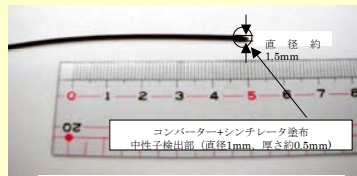


燃料体

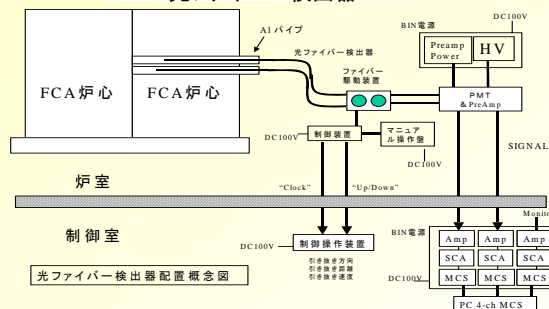


炉心

シンチレータ塗布・光ファイバー検出器



光ファイバー検出器



光ファイバー検出器測定系

光ファイバーの先端に塗布

${}^6\text{LiF}+\text{ZnS}$ 、 $\text{Al}+\text{ZnS}$ 、 $\text{Th}+\text{ZnS}$ 、 ZnS のみなど

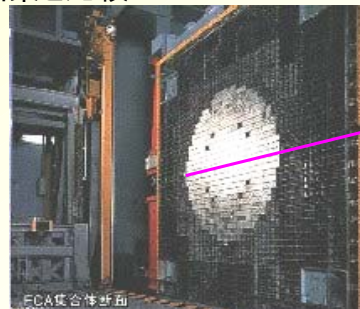
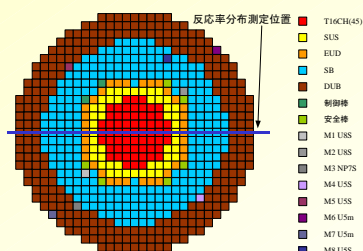
- シンチレーション光をPMTで測定
- 駆動装置により遠隔よりファイバーを移動させる
- 熱中性子炉での利用実績
– (KUCA、立教大炉など)

特長

- 位置分解能が非常に高い
- 狭い隙間に挿入可能
- 短時間で測定できる
- 塗布する物質を変化させることによりエネルギー弁別が可能

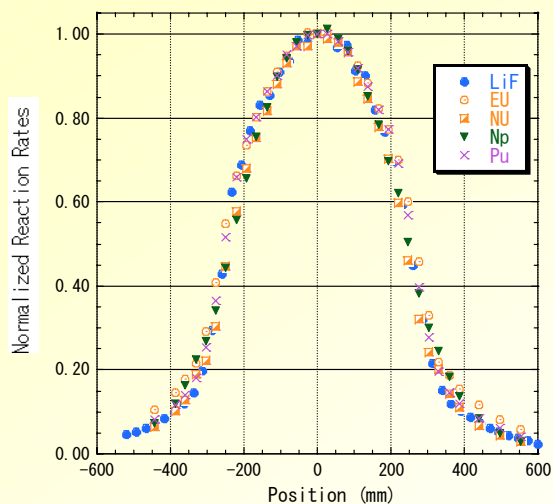
径方向 反応率分布測定実験

- FCA-XXII-1(45V)炉心において径方向の反応率分布を測定
- シンチレータ塗布・光ファイバー検出器 (${}^6\text{LiF}+\text{ZnS}$)
 - ◇ 炉心出力をモニターしながら遠隔操作にてファイバー移動
 - ◇ 1回の測定時間は約2時間
- EU、NU、Np、Puの核分裂計数管による測定も行う
- SRACコードを用いた計算結果と比較



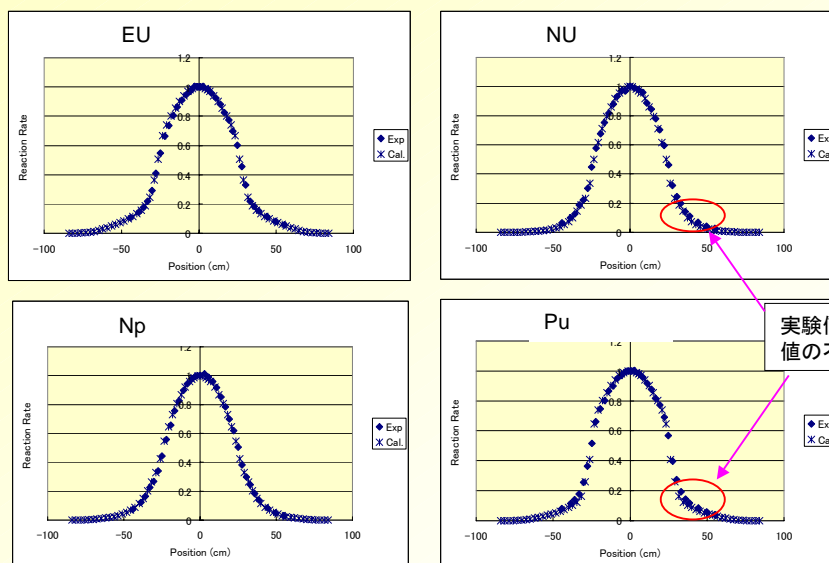
アルミパイプ
(光ファイバー
を挿入)

反応率分布の測定結果



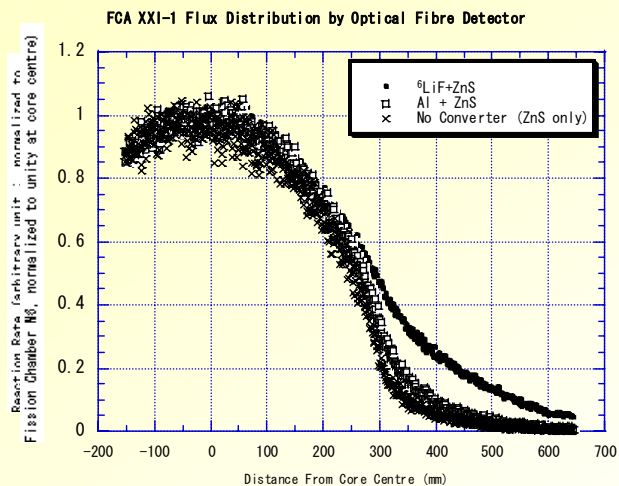
- 光ファイバー検出器により短時間で中性子束分布の詳細測定が可能
- ${}^6\text{LiF}+\text{ZnS}$ 、核分裂計数管の結果を比較すると、特にブランケット部において差が見られる
 - ブランケット部の中性子スペクトルは炉心部と大きく異なる
 - $\text{Li}(n,t)$ 反応、核分裂反応率分布に違いがある

反応率分布の計算値との比較



実験値と計算値の不一致

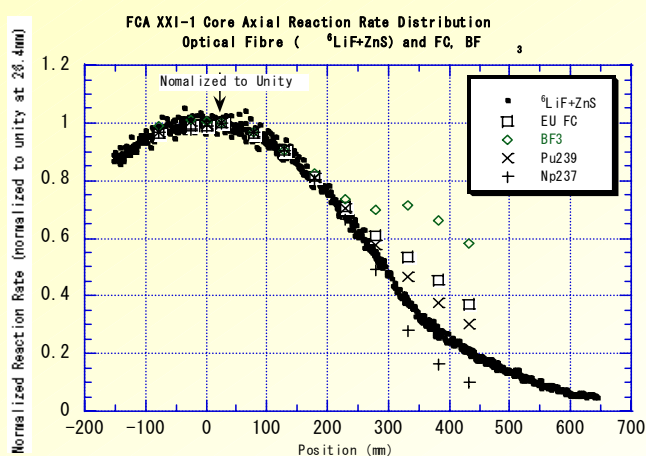
ファイバーの種類を変化させたときの 軸方向反応率分布の測定結果



光ファイバー検出器による軸方向中性子束分布測定結果
臨界状態、測定時間約48min、空間分解能: 約1.1mm

- ${}^6\text{LiF}+\text{ZnS}$ 、 $\text{Al}+\text{ZnS}$ 、 ZnS の結果を比較すると、特にブランケット部において差が見られる
 - ブランケット部の中性子スペクトルは炉心部と大きく異なる
 - $\text{Li}(n,t)$ 反応、 $\text{Li}(n,p)$ 反応、 $\text{Al}(n,p)$ 反応、 $\text{S}(n,p)$ 反応などの反応率分布に違いがある

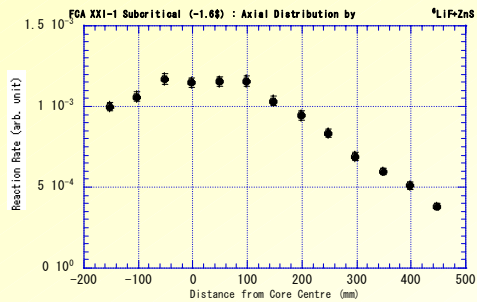
軸方向反応率分布の比較



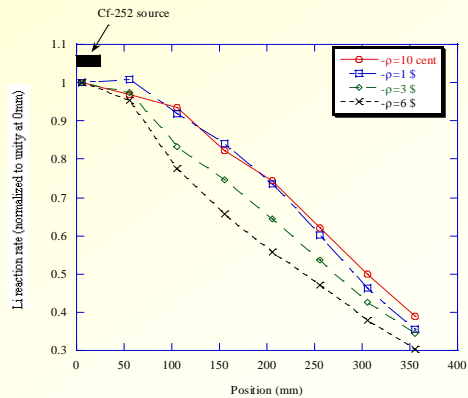
軸方向中性子束分布測定結果の比較

- 熱中性子炉体系において ${}^6\text{LiF}+\text{ZnS}$ の結果は ${}^{197}\text{Au}$ 、 ${}^{235}\text{U}$ の反応率と良く一致していた
- 各測定手法による結果を比較すると、特に軸方向ブランケット部領域において差が見られる
- ${}^6\text{LiF}$ 光ファイバー検出器の結果は ${}^{237}\text{Np}$ のような高速にのみ感度を持つ測定結果に近い

未臨界状態における ファイバーによる反応率分布測定



未臨界での中性子束分布
(${}^6\text{LiF}+\text{ZnS}$, $\rho = -1.6\%$)
(各点の測定時間: 約1000sec)



異なる未臨界状態における中性子束分布
の比較 (${}^6\text{LiF}+\text{ZnS}$)

結論と今後の課題

- 高速炉体系においても光ファイバー検出器による中性子束分布の詳細測定が可能である
- 特にブランケット領域において各種反応率分布が異なる
- ブランケット領域において一部核分裂反応率分布が計算結果と異なる
- ファイバーに塗布する物質の種類を変化させることにより、(n,p)反応などを用いて異なるエネルギー領域の高速中性子を測定することができる
- 未臨界状態においても中性子束分布の測定が可能である
- ◇ 測定結果の計算との比較
 - ✓ 各物質の反応率の詳細解析
- ◇ 未臨界状態での系統的な測定
 - ✓ 未臨界度と中性子束分布の関係の測定
- ◇ 高速中性子束分布の測定精度の向上
 - ✓ 光ファイバーに塗布する物質の検討

10. 結 言

本研究では、次世代型軽水炉の開発を念頭において、主としてプルトニウム(Pu)が含まれる MOX 燃料を軽水炉(LWR)に使用する際に重要な問題となる炉物理的諸課題の解決を目指し、日仏研究協力協定に基づいて共同研究を実施した。LWR における MOX 燃料の利用は、いわゆるブルサーマルとして知られているが、原子炉物理学(炉物理)の観点から見ると、古くて新しい課題を提起している。これは、Pu を原子炉に装荷することにより、炉心中の中性子スペクトルは必然的に硬化することになるが、LWR における Pu の有効利用あるいは Pu 燃焼の観点から、次世代型 LWR において中性子スペクトルを現行炉心のものから積極的に変化させようとの考え方が生まれて来たことと密接に関連している。これに伴って、炉物理の基本的な問題でありながら、その炉心特性あるいは運転特性等に与える影響が小さかったために今日まで残されてきた課題、例えば共鳴自己遮蔽効果の取扱い方法の高度化、燃焼計算法の高度化等に対する要求が急速に高まり、マイナーアクチニド(MA)核種を含めた超ウラン(TRU)核種の中性子断面積の評価、中性子生成時間や実効遅発中性子割合等の動特性に関連したパラメータの評価等についても飛躍的な精度の向上を求める声が高まってきた。これらの課題を解決するために次世代型軽水炉の開発に向けて、核計算法をより一層高度化するとともに、炉物理実験手法についても高度化することが求められている。本研究の評価については第三者にお任せするが、当事者としては本研究を通じて、上記の要求に応えるべく、必ずしも進展の速度は速くないが、困難な課題の解決に向けて着実に前進しつつあるものと自負している。

本研究では、原子力開発政策において類似点が多く、基礎的な分野である炉物理研究を着実に進めているフランスの CEA と KUCA 共同利用研究に参加している日本の大学の連合体である JUA(Japanese University Association)が日仏研究協力協定に基づいて 10 年を超える共同研究を実施してきた。JUA 側からすると本国際共同研究について、相手が CEA という特殊事情によるものとも考えられるが、共同研究の成果を学術誌に投稿する際には極めて大きな制約を受けざるを得ない状況にあることを痛感している。但し、これまでのところ、国際会議への発表については、制約が大き過ぎると感じることは殆どなかった。勿論、JUA 側が共同研究課題に関連した研究を独自の立場と観点で遂行し、その成果を独自に学術誌に投稿することについては何ら制約を受けるものではないが、CEA 側の成果を含めた共同論文の形に纏める場合には、投稿までにかかなりの時日を要することを覚悟しなければならない状況にある。ともあれ、これまでのところたったの 1 篇ではあるが、日仏共同論文が Nucl. Sci. Eng.誌に掲載された経験を有することは喜ばしい限りである。なお、今後、積極的に共同研究の成果を学術誌に投稿するという方向について、日仏の共同研究者レベルでは合意に達しており、現在も幾つかの研究課題について、鋭意、投稿準備を進めていることを申し添えておきたい。

ちなみに、本研究では、毎年、日仏で交互に開催される日仏セミナーを機軸として共同研究を遂行してきた。日仏セミナーなどの機会には、露に研究代表者や分担者だけではなく、研究協力協定に抵触しない範囲において、できる限り多くの関連研究者の方々にご参加いただけるよう配慮しながら研究を進めることを従前から基本的な姿勢としており、今

後もそのような姿勢を堅持し続けたいと考えている。

これに関連して、本報告書では紙面の関係上、総ての方を研究協力者として列記することは差し控えたが、JUA に加盟しておられる大学研究者の方々には、KUCA 実験及びその解析や日仏セミナー及び京都大学原子炉実験所専門研究会の席上での討論にできる限り参加していただき、時には貴重な実験データを提供していただいたり、貴重なご意見を賜ったりした。ここに記して深甚の謝意を表する次第である。

最後に、本成果報告書が少しでも次世代軽水炉の開発に役立ち、炉物理研究の進展に寄与することができたとすれば、本研究班一同にとって無上の喜びである。